



TITLE:

かた練りコンクリートの振動締固め成形と蒸気養生に関する基礎的研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

河野, 清

---

CITATION:

河野, 清. かた練りコンクリートの振動締固め成形と蒸気養生に関する基礎的研究. 京都大学, 1971, 工学博士

ISSUE DATE:

1971-09-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r1861>

RIGHT:

かた練りコンクリートの振動締固め成形と  
蒸気養生に関する基礎的研究

昭和46年3月

河 野 清

# かた練りコンクリートの振動締固め成形と 蒸気養生に関する基礎的研究

昭和46年3月

河 野 清

# かた練りコンクリートの振動締固め成形と蒸気養生 に関する基礎的研究

## 目 次

序 論 .....	1
第1編 かた練りコンクリートの振動締固め成形 .....	3
第1章 緒 論 .....	3
第2章 コンクリートの振動締固めに関する既往の研究 .....	5
§ 1. 緒 言 .....	5
§ 2. コンクリートの振動締固め過程 .....	6
§ 3. コンクリートの締固め効果の判定方法 .....	7
§ 4. 振動締固めにおよぼす諸要因の影響 .....	8
§ 5. 結 語 .....	13
第3章 振動数、振幅、加速度および振動時間の影響 .....	14
§ 1. 緒 言 .....	14
§ 2. 実験の概要 .....	14
§ 3. 振動数、振幅と加速度との関係 .....	16
§ 4. 実験結果とその考察 .....	18
§ 5. 結 語 .....	22
第4章 砕石コンクリートの振動締固め .....	24
§ 1. 緒 言 .....	24
§ 2. 振動締固め条件の影響 .....	24
§ 3. 各種混和材料を用いたコンクリートの振動締固め .....	27
§ 4. 高振動数締固めの効果について .....	33
§ 5. かた練りコンクリートの配合と強度 .....	36
§ 6. 結 語 .....	42
第5章 人工軽量骨材コンクリートの振動締固め .....	43
§ 1. 緒 言 .....	43
§ 2. 振動締固め条件の影響 .....	44
§ 3. かた練り人工軽量骨材コンクリートの基礎的性質 .....	53
§ 4. 結 語 .....	58
第6章 型わくの形状、寸法および材質の影響 .....	59
§ 1. 緒 言 .....	59
§ 2. 寸法および材質の強度におよぼす影響 .....	59
§ 3. 各種コンクリートの振動締固め効果におよぼす型わくの影響 .....	63
§ 4. 結 語 .....	67



第 7 章	超かた練りコンクリートの振動締固め	68
§ 1.	緒 言	68
§ 2.	超かた練りコンクリートの振動締固め条件	68
§ 3.	即時脱型を行なうコンクリートの振動締固め条件	76
§ 4.	結 語	80
第 8 章	配合とワーカビリティ およびコンシステンシー	81
§ 1.	緒 言	81
§ 2.	ワーカビリティ・コンシステンシーの試験方法	82
§ 3.	ワーカビリティ・コンシステンシーにおよぼす諸要因の影響	84
§ 4.	超かた練りコンクリートのコンシステンシー	100
§ 5.	かた練りコンクリートに適した試験方法の検討	104
§ 6.	配合を修正する場合の指針について	106
§ 7.	結 語	108
第 9 章	結 論	110
第 2 編 かた練りコンクリートの蒸気養生		113
第 1 章	緒 論	113
第 2 章	常圧蒸気養生に関する既往の研究	115
§ 1.	緒 言	115
§ 2.	常圧蒸気養生について	115
§ 3.	蒸気養生に関する既往の研究	116
§ 4.	結 語	126
第 3 章	使用材料と配合が蒸気養生におよぼす影響	127
§ 1.	緒 言	127
§ 2.	セメントの品質の影響	127
§ 3.	各種混和材料の影響	150
§ 4.	人工軽量骨材コンクリートの蒸気養生	164
§ 5.	セメント水比とセメント量の影響	168
§ 6.	結 語	173
第 4 章	蒸気養生条件の影響	174
§ 1.	緒 言	174
§ 2.	成形温度が圧縮強度におよぼす影響	174
§ 3.	前養生期間が A E コンクリートの強度におよぼす影響	178
§ 4.	最高温度の影響	179
§ 5.	等温養生期間中の強度発現と冷却方法の影響	183
§ 6.	蒸気養生後の養生条件の影響	185
§ 7.	最適蒸気養生条件について	189
§ 8.	結 語	190

第 5 章	蒸気養生を行なったコンクリートの諸性質	191
§ 1.	緒 言	191
§ 2.	圧 縮 強 度	191
§ 3.	曲げ強度と引張強度	194
§ 4.	付 着 強 度	196
§ 5.	引 張 変 形	201
§ 6.	乾 燥 収 縮	205
§ 7.	耐 久 性	208
§ 8.	その他の性質について	211
§ 9.	結 語	212
第 6 章	蒸気養生期間の短縮について	214
§ 1.	緒 言	214
§ 2.	短時間養生を行なったコンクリートの強度	214
§ 3.	蒸気養生期間と圧縮強度	218
§ 4.	2 段階の蒸気養生	221
§ 5.	短時間養生によるひびわれ発生について	223
§ 6.	結 語	228
第 7 章	超かた練りコンクリートの蒸気養生	229
§ 1.	緒 言	229
§ 2.	超かた練りコンクリートの蒸気養生	229
§ 3.	即時脱型を行なったコンクリートの蒸気養生	232
§ 4.	超かた練りコンクリートの諸性質	234
§ 5.	超かた練りコンクリートに対する混和材料の影響	243
§ 6.	即時脱型用コンクリートの適正配合	248
§ 7.	結 語	257
第 8 章	蒸気養生以外の促進養生	259
§ 1.	緒 言	259
§ 2.	蒸気養生以外の促進養生方法について	259
§ 3.	オートクレーブ養生した石棉ボードの強度におよぼす 使用セメントと原料配合比の影響	263
§ 4.	銅製金網を用いたコンクリートの電熱養生	266
§ 5.	特殊な製品に対する簡易電熱養生の利用	268
§ 6.	促進養生によるコンクリート強度の早期判定	271
§ 7.	結 語	278
第 9 章	結 論	279
	総 括	281
	謝 辞	284
	参 考 文 献	285

# かた練りコンクリートの振動締固め成形と蒸気養生 に関する基礎的研究

## 序

## 論

近年、工場生産されるプレキャスト部材をはじめ、舗装コンクリート、ダムコンクリート、プレストレストコンクリートなどの構造物を施工する際には、かた練りコンクリートを使用する例が多くなっており、単位水量を少なく、あるいは水セメント比を小さくしてコンクリートの品質を向上し、経済的なコンクリート配合をえようとする傾向にある。

とくに、今日では、急速施工、工費低減などの強い要求からコンクリートおよび鉄筋コンクリート工場製品（以下コンクリート製品という）が建設工事の各分野で使用されるようになってきている。<sup>1)</sup>セメント協会の昭和44年度の統計では、わが国における全セメント使用量5030万tのうち、14.5%がセメントを用いた製品に使用されている現状である。土木学会でも昭和44年に鉄筋コンクリート工場製品設計施工指針（案）を作成し、コンクリート製品を設計、施工する場合の一般的な指針を示している。<sup>2)</sup>

コンクリート製品の製造の際には、一般にスランプ数センチメートル以下のかた練りコンクリートが用いられる。しかしながら、製品を対象としたかた練りコンクリートに関する研究結果は、遠心力締固め製品をのぞくときわめて少ない。コンクリートの単位水量を減少することによつて、水セメント比が小となり、硬化したコンクリートでは、その強度をはじめ耐久性、水密性、容積変化などの所要の品質は向上するが、これはコンクリートの締固め成形、養生などが十分に行なわれた場合であり、スランプの小さいコンクリートではその施工が不良であると逆にコンクリート中に空気を残してその品質をそこなうことも考えられる。したがつて、単位水量の少ないかた練りコンクリートでは、その成形施工性はきわめて重要な問題であり、とくに振動締固め成形は十分に研究を行ない最善の方法で実施しなければならない。

ダムコンクリートや舗装コンクリートでは工事の規模が大きく、それぞれにバイブロードーザや表面振動機を用いてよい施工が行なわれており、施工上の問題点は少ない。一方、コンクリート製品については、小規模の工場で製造されている場合が多く、従来よりの経験によつて例も多い。その形状、寸法はもとより種類によつて所要の品質はかなり相違しているが、使用材料や配合に適応した最適の締固め成形を行なう必要があり、今後、製品の成形施工法について再検討しなければならない現状である。すなわち、コンクリートのワーカビリティやコンシステンシーを考慮し、振動数、振幅、加速度、振動時間などの最適の組合せを求めなければならない。

とくに、最近では、粒形や粒度のよい天然骨材が不足し、角ばつた碎石も使用されるようになり、さらに人工軽量骨材もコンクリート製品に用いられる傾向にある。これらの材料を使用したコンクリートでは、締固め成形の条件も川砂利コンクリートに比べて多少ことなつてくると考えられるが、この点に関して研究した結果は遠心力締固めの場合を除くとまだほとんどみられない。また、コンクリートの成形施工性を改善したり、コンクリートの品質を向上するために各種の混和材料が開発され、市販されており、コンシステンシーの小さいかた練りコンクリートではワーカビリティをよくするためにその使用も考慮されなければならないが、その成形施工性と関連づけて研究した結果は少ない。さらに、型わくの形状、寸法、材質などの締固め効果に与える影響も検討されなければ

ならない。

一方、コンクリート製品の中には、即時脱型工法を採用し、量産を行なっているものもあるが、これにはゼロスランブの超かた練りコンクリートを使用するので、その品質向上のためには振動締固め方法や条件がきわめて重要になつてくる。

また、一般に、コンクリートのコンシステンシーの測定にはスランブ試験が用いられているが、製品用のかた練りコンクリートに適したワーカビリティあるいはコンシステンシーの測定方法についても検討する必要がある、かた練りコンクリートに対する単位水量、単位セメント量、細骨材率その他の配合要因の影響も究明する必要があると思われる。

つぎに、かた練りコンクリートを型わくに成形した場合、工場生産される製品では、早期に高強度をえて早く型わくを取りはずす必要がある、このため温度をあげてセメントの水和、コンクリートの硬化を促進するいわゆる促進養生が採用されている。促進養生には、蒸気養生、高温高圧養生、電気養生、赤外線養生、加圧養生など種種の方法があるが、一般のコンクリート製品では大気圧下の蒸気養生すなわち常圧蒸気養生がもつとも広く用いられており、これに関しては従来より多くの研究がとくに欧米、ソ連などを中心に行なわれている。

効果的な蒸気養生を行なうためには、使用材料や配合におよぼす蒸気養生の影響を調べ、蒸気養生に適したセメントや混和材料を用いたり、そのコンクリートに最適の養生条件を採用しなければならない。一般に、硬化の初期に高温養生を行なうと、初期材令の強度は高くなるが、長期材令における強度増進率が低下することが報告されており、この長期材令におけるコンクリートの品質をできるだけそこなわないような蒸気養生条件を採用しなければならない。また、できるだけ型わくの回転を早め、生産性を高めるためには、養生期間を短縮する必要があるが、強度発現の不振、ひびわれ発生などコンクリートに有害な影響を与えない短時間の養生条件について究明する必要があると思われる。

さらに、蒸気養生したコンクリートの圧縮強度については多くの研究が行なわれているが、付着強度、曲げ強度、引張強度、弾性係数、乾燥収縮、耐久性、水密性などの諸性質については研究報告が少なく、とくにわが国における研究結果が乏しく、今後さらに検討しなければならないと考えられる。

また、単位水量のきわめて少ない超かた練りコンクリートや型わくによる拘束のない即時脱型コンクリートについての適切な蒸気養生条件とその養生効果についても実験研究を進めなければならない問題である。

この論文は、主としてスランブ数センチメートル以下のかた練りコンクリートを対象として、コンクリート製品を工場で生産する場合のように、型わくにコンクリートを詰めて養生するいわゆる成形施工上の問題点として、とくに締固め成形と蒸気養生とをとりあげ、製品用コンクリートの品質向上、養生方法の改善などを目的として、使用材料、配合などと関連づけて基本的な実験研究を行ない、その成果をとりまとめたものである。

以下、本論文の内容をつぎの2編、すなわち、

第1編 かた練りコンクリートの振動締固め成形

第2編 かた練りコンクリートの蒸気養生

にわけて述べる。



# 第 1 編 かた練りコンクリートの振動締固め成形

## 第 1 章 緒 論

コンクリート製品には、一般にスランプ数センチメートル以下のかた練りコンクリートが用いられているが、この理由は、かた練りコンクリートにすると、

- (1)単位水量が少なくすむので、セメント量が同じであれば、水セメント比が小となつて強度が大となる。
- (2)水セメント比を一定にすると、単位セメント量が節約でき、経済配合が選定できる。
- (3)水セメント比、単位水量などが小となり、強度以外の耐久性、水密性、容積変化などの諸性質も向上する。

などの利点のあるためであるが、一方、コンシステンシーが小さくなるので、練りませ、運搬、打込み、締固めなどの施工の際には十分な配慮が必要になつてくる。とくに、型わくに成形する際の振動締固めは、製品の品質の良否と関係するきわめて重要な問題であり、製品の生産性とも関係するし、製造工程の中でもつとも研究を要するところであるといえる。

コンクリート製品の締固め成形の方法は、その種類や形状、寸法、用いるコンクリートのワーカビリティあるいはコンシステンシー、工程などによつてこととなり、内部振動機、型わく振動機、振動台、遠心力成形機、加圧機などが採用されている。すなわち、はりのような大型製品の締固めには内部振動機や型わく振動機を用い、管類では遠心力締固めを行ない、板状製品や小型のコンクリート製品とくに道路用や河海用製品では振動台が一般的に使用されている。また、超かた練りコンクリートを用いた板状製品やセグメント、矢板などの一部では、加圧機による加圧振動締固めも採用されている<sup>3)</sup>。

振動台によるかた練りコンクリートの締固めに関しては、岡田<sup>4)</sup>、英国の土木学会と構造学会<sup>5)</sup>、Davis<sup>6)</sup>、Cusens<sup>7)</sup>、Washa<sup>8)</sup>、Green<sup>9)</sup>、Benett<sup>10)</sup>、Wadhwa<sup>11)</sup>ら、その他の研究があるが、コンクリートの締固め効果や最適締固め条件については、研究者によつてかなりことなつた結果がえられている。これは、振動機の種類や性能はもとより、使用材料、配合、コンシステンシー、型わくの形状や寸法などの差異によつてコンクリートの締固め効果が、相違するためと考えられる。したがつて、既往の研究結果について調査し、振動締固めに関する問題点をつかみ、使用材料、配合、ワーカビリティなどに関連づけて、振動数、振幅、加速度、振動時間などの要因がかた練りコンクリートの締固め効果におよぼす影響について研究を進めなければならない。

道路用、河海用などのコンクリート製品を製造している工場では、振動台による締固め成形の際に、一般に4000 vpm 前後の振動数を採用している場合が多いが、既往の研究結果をみても、締固めの際の最適振動数については低振動数説<sup>5)7)</sup>と高振動数説<sup>9)10)</sup>とがあり、品質がよくても経済的なコンクリート製品をつくるためには、最適の締固め条件について、使用材料、配合などを考慮して今後さらに研究を行なう必要があると考えられる。

とくに、最近では骨材事情の悪化よりコンクリート製品においても砕石や人工軽量骨材が用いられる傾向にあり、この種の骨材では形状が川砂利とことなり、また軽量骨材では軽くなるので、これらの骨材を用いたコンクリートの締固め条件は、川砂利コンクリートとは多少ことなることが予想され、実験的に究明されなければならない。また、混和材料を用いてワーカビリティを改善した場合の締固め効果についても明らかにする必要がある。また、諸外国では、土木用のコンクリート製品は大型化する傾向にあるので、実際の工場においては、型わくの形状、寸法および材質の振動<sup>12)</sup>

締固め効果におよぼす影響も問題になると思われる。

一方、鉄道用のまくらぎ、土木用のブロック類などの製品では、ゼロスランブの超かた練りコンクリートを用い、締固め成形後、ただちに型わくを取りはずす即時脱型工法によつて製造しているものが多い。この場合には、使用するコンクリートはパサパサのいわゆる湿つた土のような状態のものをを用いるので、その振動締固めはきわめて重要な問題であり、土木用ブロックを対象とした阪本<sup>13)</sup>の研究があるが、配合と関連づけてさらに究明する必要がある。

ボール、パイル、ヒューム管などの中空円筒形の製品に用いる遠心力締固めについては、杉木<sup>14)</sup>、綾<sup>15)</sup>、丸安<sup>16)</sup>、岡田<sup>17)</sup>、西林<sup>18)</sup>ら、その他の研究があり、問題点が明らかにされている。一般に、遠心力を20～50gとし、低速、中速、高速と次第に回転数を高め、回転時間は直径によつて5～15分締固めを行なつており、車輪式とジャイロ式では、上下振動の加わる前者が締固めのよいこと、遠心力締固めによつて水がしほり出され、水セメント比が数パーセント低くなり、コンクリートの品質が向上することなどが報告されている。<sup>19)20)</sup>

なお、コンクリートの締固めの難易、あるいは締固め時間は、そのワーカビリティー、コンシステンシーなどのまだ固まらないコンクリートの性質ときわめて密接な関係がある。まだ固まらないコンクリートの性状を調べるには、一般に常用されているスランブ試験のほか、VB試験、CF試験など種種の方法があるが、製品用のかた練りコンクリートにもつとも適した方法について検討し、締固め条件との関係も明らかにするのが望ましい。さらに、かた練りコンクリートの配合とくに単位水量、単位セメント量、細骨材率などとコンシステンシーとの関係を調べておくこと適正配合を選ぶ場合きわめて有利であると考えられる。

したがつて、第1編では、振動台、内部振動機による振動締固めについて既往の研究を調査したのち、コンクリート製品の締固め成形方法の改善やその品質向上に関する基礎資料をえることを目的として、川砂利、碎石および人工軽量骨材を用いたかた練りコンクリートを振動台を用いて締固め成形し、その締固め効果におよぼす振動数、振幅、加速度および振動時間の影響について、単位セメント量、単位水量、混和材料、コンシステンシーなどのコンクリートの配合を変えて実験的に検討し、最適締固め条件について考察を行なつた。また、型わくの形状、寸法、および材質の影響についても調べ、さらに、即時脱型用の超かた練りコンクリートの振動締固めについて、加圧成形の影響も含めて検討した。最後に、かた練りコンクリートの配合とスランブ、VB値、CF値などとの関係を求め、ワーカビリティー、コンシステンシーなどの試験方法や最適細骨材率について論じ配合を修正する場合の指針を示した。

## 第 2 章 コンクリートの振動締固めに関する既往の研究

### § 1. 緒 言

コンクリートが構造物に使用されるようになって以来、その施工技術の発展にいちじるしく貢献したものは振動機による振動締固め工法の採用である。締固めの際に振動機を用いると、手突きではうまく施工できなかったかた練りコンクリートの使用が可能になった。この振動締固め工法にはつぎのような利点が考えられる。

- ① コンクリートの打込み、締固めが容易になる。
- ② 水セメント比が小さくでき、強度、耐久性、水密性などが大きくなる。
- ③ コンクリート中の空げきが減少し、密実で均等質になる。
- ④ 体積変化、クリープなどが小さくなる。
- ⑤ すりへり抵抗、付着強度などが大となる。
- ⑥ 表面の気泡を排除し、美観をよくする。
- ⑦ 経済的なコンクリートがえられる。

すなわち、品質のよいコンクリートがえられることになる。

永盛<sup>21)</sup>の報告によると、コンクリートの締固めに振動台を初めて用いたのは 1890 年であり、1906 年には米国の地質調査所において供試体の成形の際に、ニューマチックバイブレーターを用いており、1915 年には米国の標準局において振動締固め工法の研究を初めて行なつたが、それまでの突き固め方式に比べて締固めの成果はあまりみられなかつたので研究は継続されなかつたと述べている。

しかし、1919 年 Abrams<sup>22)</sup>が水セメント比法則を発表して以来、かた練りコンクリートの利点を生かす施工法が注目されるようになり、1930 年頃より振動機による締固めの研究が進められ、振動機の型式や性能が改善され今日に至っている。

とくに、英国では、1935 年に土木学会と構造学会との合同委員会<sup>5)</sup>をつくつて研究を進め、1956 年にはその結果を“コンクリートの振動締固め”と題する報告書<sup>23)</sup>にまとめている。また、米国でも、ACI が中心になつて振動締固めに関する調査、研究を行ない、ACI Committee 609<sup>25)</sup>では、振動機、配合、各種構造物に対する締固め方法などについて報告している。

わが国でも、1935 年頃より内部振動機によるコンクリートの振動締固めに関する研究が盛んになり、<sup>24)</sup> 内山、<sup>25)</sup> 藤井ら、<sup>26)</sup> 馬場などによつて研究成果が報告されている。1945 年以降になると岡田、<sup>4)</sup> 内山ら<sup>27)</sup>がコンクリートの締固め<sup>28)</sup>について報告しているが、研究結果はきわめて少ない。

1960 年に、日本建設機械化協会<sup>29)</sup>によつて行なわれたコンクリートの振動締固め機構に関する研究の報告書<sup>30)</sup>が出されており、最近では、尾坂<sup>31)</sup>が PC はりを対象としたかた練りコンクリートの締固めについて論じている。また、神山らは内部振動機による振動の伝播、締固めの有効範囲などについて報告している。しかし、コンクリート製品を対象とし、振動台による締固めについて検討した結果は、超かた練りコンクリートについて研究した阪本<sup>13)</sup>の報告やモルタル板に関する栗山<sup>33)</sup>の報告があるが、わが国においてはほとんどみられない現状である。

諸外国では、近年、振動締固めに関してかなりの研究報告がみられるので、ここでは遠心機による締固め以外の、振動台あるいは内部振動機による締固めを中心に既往の研究結果を調査し、振動締固め過程、振動締固め効果の判定、締固めに影響する諸要因などについて検討し、コンクリート製品の振動締固め成形の際の問題点について述べた。

## § 2. コンクリートの振動締固め過程

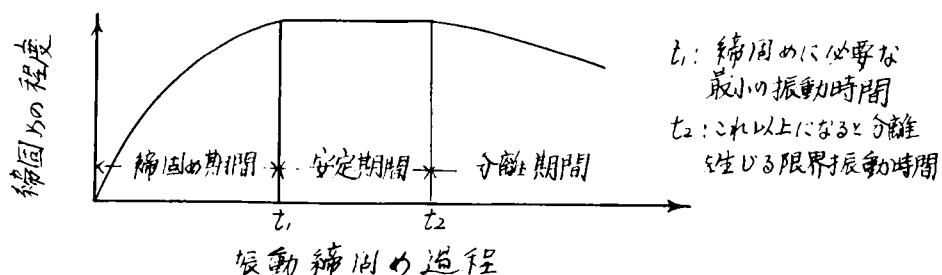
コンクリートは、セメント、細骨材、粗骨材および水よりなり、必要に応じた混和材料が加えられるが、これらの構成材料は、比重はもとより粒径もことなり、これらを混合したものは当然不均一であり、しかもまだ固まらないコンクリートにおいては、時間的に絶えず状態が変化するので、コンクリートの締固めの際の振動挙動の解析はきわめて複雑であり、また、使用材料と配合、コンシステンシー、型わくの形状と寸法、振動機の種類と性能など種種の要因によつて影響されるので、その振動挙動についてはまだ十分に究明されていない。

型わくに打ち込んだコンクリートに振動機をあてると、振動エネルギーがコンクリート構成粒子に伝達され、セメントペーストが流動化し、骨材粒子の移動が比較的自由になり、各粒子は安定した状態に落ち着き、一方、内部の気ほうはそれとともに上方に脱出し、コンクリートが高い密度になつてくるものと考えられる。

このようなコンクリートの振動締固め過程について Kolk<sup>34)</sup>は、初期沈下、気ほう排除、安定化の3段階にわけて説明しており、各段階の継続時間は配合によつて非常にことなり、肉眼で判定できる場合とできない場合とがあり、非常にワーカブルなコンクリートでは第1段階の初期沈下は実際上ないこともあり、また、第3段階では振動時間を過度に長くすると材料の分離を生じると報告している。<sup>35)</sup>岡田も、コンクリートを振動で締め固める場合、その締め固められる過程を、(1)初期沈下、(2)空気逸散、(3)安定の3期にわけて説明している。

Bergstrom<sup>36)</sup>は圧力計をコンクリート中に埋込み、振動を受けたときのコンクリートの内部圧力は振動時間とともに増加し、これとともに圧力振幅も増加するが、ある時間を経過すると一定になることを示している。さらに、羽根付軸棒をもつた締固め度計を用いて、振動締固め時間と締固めの程度との関係を求め、図-1.2.1のように締固め過程を(1)締固め期間、(2)安定期間、(3)分離期間の3期に分けて説明し、この上昇締固め曲線と圧縮強度とはよい相関がえられており、分離を示すものは凍害抵抗性が悪くなると報告している。また、締固めの程度は水セメント比やコンシステンシーと関係の深いことを示し、コンクリートがやわらかくなると振動時間とともに分

図-1.2.1. コンクリートの締固め度曲線<sup>36)</sup>



離の危険性を増すことを指摘している。尾坂は、締固め過程を、(1)初期の流動的な段階、(2)締固め効果のある段階、(3)安定状態の段階、(4)分離の4段階に分けて説明している。

一般に、コンクリートを型わくに詰めてから振動機を用いて締め固める場合の過程は以上のような段階にわけて考えられるが、これらの段階の継続時間はコンクリートの配合、コンシステンシーはもとより、使用する振動機の種類や性能によつてことなり、各段階はある程度重複して起こるので明確な区別は困難である。とくに、コンシステンシーの大きいコンクリートは締固めを



開始してごく短時間で安定状態に達するので、締固め時間を長くすると分離の現象が顕著になる。

コンクリートを型わくに成形し、振動を加えると振動エネルギーは型わくからコンクリートに伝わり、各構成粒子は振動を始め、各粒子間の圧力と支持力のバランスがくずれ、粘着力に打ちかたつて粒子はできるだけ安定状態に到達しようとする。気ほうは、粘性の低下し流体化したセメントペーストあるいはモルタル中を通つて上方に押し出される。振動の継続によつて、粒子相互のかみ合せが進み、組織は緻密になる。しかし、振動時間が長くなると、粗骨材とモルタル、ペースト、水などの分離を生じることになり、とくにスランブの大きいコンクリートでは、粗骨材が下方に沈み、コンクリート表面からセメントの微粒子を含む水の飛散する現象が振動台による締固めの際に認められており、分離が顕著な場合には硬化後にレイタンス層が現われている。

したがつて、コンクリートの締め固められる状態をよく観察し、材料の分離を生じない範囲で十分な締固めを行なうことが大切である。

### § 3. コンクリートの締固め効果の判定方法

品質のよいコンクリートをつくるためには、ワーカビリティに応じてもつとも効果的な締固め方法を採用しなければならない。実際に用いた締固め方法あるいは締固め条件が適当かどうか、またどの程度の締固め時間でよいか、その締固めの程度、良否などを判断する必要がある。この締固め効果の判定方法については、まだ固まらないコンクリートあるいは硬化コンクリートについて種種の方法が検討されており、これらをまとめると表-1.2.1のとおりである。

表-1.2.1 コンクリートの締固め効果の判定方法

コンクリートの状態	振動締固め効果の判定方法	研究者
まだ固まらないコンクリート	① 電気抵抗の測定による方法	岡田 <sup>4)</sup>
	② 内部圧力の測定による方法	Bergstrom <sup>38)</sup> 、藤井 <sup>25)</sup> 、神山 <sup>32)</sup>
	③ 軸圧の対数減衰率による方法	Bergstrom <sup>36)38)</sup>
	④ コンクリート中の粒子の振幅の測定	馬場 <sup>26)</sup> 、Wiffin <sup>39)</sup>
	⑤ コンクリートの洗い分析による方法	岡田 <sup>27)</sup>
	⑥ まだ固まらないコンクリートの単位重量の測定	
	⑦ コンクリート表面の沈下と光沢の程度	
硬化コンクリート	① 圧縮強度による方法	多くの研究者 <sup>40)</sup>
	② コンクリートの単位重量、比重、密度、充てん率	Kolek、Kirkham <sup>41)42)</sup> 、阪本 <sup>13)</sup>
	③ コンクリートの切断面の観察	Crawly <sup>43)</sup>
	④ 脱型後のコンクリートのはだ面	
	⑤ 超音波速度の測定	Kolek <sup>40)</sup> 、Cusens <sup>7)</sup>
	⑥ 反発硬度による方法	Kolek <sup>40)</sup>
	⑦ 動弾性係数による方法	Kaplan <sup>44)</sup>
	⑧ $\gamma$ 線の利用	Kirkham <sup>41)</sup>

従来より締固め効果の判定には、コンクリートの品質判定の基準となつてゐる圧縮強度を用いる場合が多く、実験室で供試体を種種の条件で締め固めて比較検討する場合には便利である。しかし、実施コンクリートでは構造物の一部となつてゐるのでコア採取に費用と時間を要することになる。Kolek<sup>40)</sup>は、内部振動機を用いて大型ブロックを締め固めた場合、圧縮強度、超音波

速度、シュミットハンマーによる反発硬度（反発かたさともいう）などについて比較検討し、超音波速度がよい方法であると述べている。また、実際の構造物の施工の際には、まだ固まらない状態のコンクリートでは、肉眼観察以外その締固め効果の判定はかなり困難であると考えられる。

表-1.2.1に示した締固め効果の判定方法には、それぞれ一長一短がある。本研究では、比較的小型供試体を用いて実験室で基礎的な検討を行なったので、これらの方法の中で、硬化コンクリートについては主として、品質判定の基準になつてゐる圧縮強度によつて締固め効果の判定を行ない、このほか、動弾性係数、単位重量、切断面などについても検討を行なった。

まだ固まらないコンクリートについては、内部の構成粒子の移動状態が観察できればきわめて好都合である。しかし、個々の粒子の挙動をみることはガラス製の型わくを用いれば表面的には可能であるがきわめて困難である。実験室では小型供試体を用いるので切断は比較的容易であり、振動台では締固め中に、コンクリートの不規則な回転を生じることがあるので着色コンクリートを3層に打ち、硬化コンクリートの切断面を観察して締固め状態の観察も行なった(p.50参照)。

また、まだ固まらないコンクリートについては、空げきの排除の程度が締固めの良否の一つの判定基準になるので、コンクリート中の空気量の測定も効果的であると考えられる。したがつて、本研究で振動数、振動時間などの要因が締固め効果におよぼす影響を調べる場合、エアメーターの容器を用い、空気量の実測による締固め効果の判定も試みた。なお、過振動による材料分離の状態は、締固め中のコンクリートの挙動や硬化後の切断面の観察によつて判定を行なった。

#### § 4. 振動締固めにおよぼす諸要因の影響

振動機によつてコンクリートに振動エネルギーを与え、締固めを行なうが、その締固め効果は、振動機の種類、型わくの形状、寸法および材質、振動機の取り付け方法などはもとよりコンクリートの使用材料と配合、あるいは振動機の振動数、振幅、加速度、振動時間をいかにとるかによつてことなるので、従来の研究結果をみても必ずしも一致した見解はえられていないが、振動締固め結果におよぼす諸要因の影響について調査を行なった。

##### (1) コンクリートの配合

水セメント比、単位セメント量、単位水量、コンシステンシーなどのコンクリートの配合は、振動締固め効果におよぼす大きな要因の一つである。

馬場<sup>26)</sup>は、内部振動機を用いて配合のことなるコンクリートの振動締固めについて研究し、水セメント比やスランプが振動伝播性にきわめて密接な関係のあることを示している。また、骨材粒度の影響についても検討し、粗粒率が小となつてスランプが小さくなると振動の伝播性は悪くなると報告している。Green<sup>45)</sup>は、振動台による締固めの際に、最適振動数に対する細骨材の割合について検討し、水セメント比が小さいと2.5 mmを通過する砂は少なくてもよいが、水セメント比が大きくなるとこの割合を増加するのが強度的にみてよい結果がえられると述べている。しかし、Williams<sup>46)</sup>の電磁式振動台を用いてモルタルおよびコンクリートを2分間完全締固めを行なった研究によると、細骨材の粒度は影響しないと報告している。また、河上<sup>47)</sup>の研究によると、締固め効果をあげるには、材料の分離を生じないようにして十分に締め固める必要があり、このためには、粗・細骨材の粒度だけでなく、各材料分子の大きさと比重に応じて単位量を定めることが重要であると述べている。

単位セメント量の影響については、Wadhwa<sup>11)</sup>らが富配合にすると最高強度を与える振動台の振動時間は短くなると報告している。一方、内部振動機を採用した神山<sup>31)</sup>らの単位セメント量430 Kgと330 Kgのコンクリートを用いた研究では、コンシステンシーが一定であれば、振動の有効範囲からみたセメント量による締固め効果の差はほとんどないと述べている。内山<sup>28)</sup>は、コンシステンシーの小さいかた練りにすると単位水量、水セメント比が小となり、セメントの節約ができるが締固めに時間がかかり、その費用が大となるので、両者の合計費が最小に

なる配合と締固め条件を選ぶべきであると報告している。

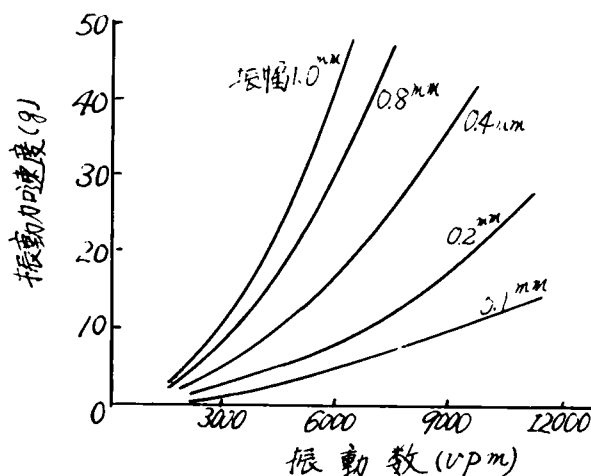
Kolek<sup>34)</sup> は、コンクリート締固めにはワーカビリティー、振動加速度、振動時間をもつとも重要な要素であり、ワーカビリティーの悪いコンクリートでは加速度を大きくし、振動時間を長くする必要のあることを示している。Plowman<sup>48)</sup> は、一定の振動数、加速度の下で締固めに要する時間を測定し、この時間はコンクリートの単位水量の多少によつて影響され、セメント量は関係がないと述べている。また、Poucher<sup>49)</sup> は、コンクリートの締固めと流動性について検討し、粗骨材量が細骨材量に比べて増加するとワーカビリティーがよくなり締固めが容易になると述べ、碎石より川砂利コンクリートのほうが流動性はよいことを指摘している。Powers<sup>50)</sup> は、容易な締固めを行なうにはスランプ 2.5 cm から 5 cm が適当であり、単位水量の少ないごくかた練りや粗骨材の多い配合では強力な締固めが必要であるとしている。また締固めに対してはコンクリート中の空げき比が重要な因子であることとし、振動されるコンクリートは粗骨材に対する細骨材の最適な割合があり、骨材の空げき率が締固めの大きな要因であることを指摘している。

使用骨材の影響については、英国の土木学会と構造学会の連合委員会の報告によると、碎石コンクリートでは十分な締固めをえるために振動時間を長くする必要があるとし、阪本<sup>13)</sup>も超かた練りコンクリートで砂利と碎石とを用いたものを比較し、碎石コンクリートでは振動時間を長くしたほうがよいことを報告している。一方、Stewart<sup>51)</sup> は、碎石コンクリートは川砂利コンクリートより結合力が強く、締固め効果がよいが、これは骨材面が粗であり、非常に細かい微粉のあること、ペースト量の多くなることなどの影響であろうと述べている。

## (2) 振動数について

コンクリートの振動締固め効果は、原理的には振動加速度に関係しているものと考えられるが、振動波形が正弦曲線の場合、振動加速度は振動数の 2 乗に比例するので、振動数は締固め効果に対する一つの重要な因子となる。この場合、振動数、振幅、加速度などの振動特性値の間には、図 - 1. 2. 2 のような関係があり、振幅が同じであれば、振動数が高くなるにつれて、加速度も増加する。したがって、コンクリートの振動締固め効果に対する振動数の影響

図 - 1. 2. 2 振動数と加速度との関係



に関する研究は古くから行なわれ、両者の間に深い関係があることが認められている。

Green<sup>9), 45)</sup>は、コンクリートの最適振動数は加速度が変つても一般に変化しないと述べ、振動数の影響を重要視しており、電磁式の振動台を用いてモルタルおよびコンクリートの振動締めを行ない、標準粒度の骨材を用い、加速度4gの場合、最適振動数は7500~11000 vpmであると報告している。Cusens<sup>7)</sup>は電磁式の振動台を用い、ほぼ完全に締め固まつたとき共振する機構を考え、加速度5gとし振動数3000~12000 vpmについて実験し、配合によつて多少こととなるが最適振動数は6000 vpm前後であり、また、木製型わくを用いた超かた練りとした場合、打込み高さの大きい場合などには加速度が同じなら、低振動数締め固めが高振動数より有利であると述べている。Kolek<sup>34)</sup>の研究によると、低振動数の振動機を用いると沈下は早くなるが、ワーカビリティのよいコンクリートを除いて表面状態は高振動数のほうがよくなると述べ、第1段階の締め固めに低振動数を用い、第2段階で高振動数と組合せて用いるのがよいとしている。Wadhwa<sup>11)</sup>らは、振動台によるコンクリートの締め固め効果は振動数の増加とともに増大すると報告し、Bennett<sup>10)</sup>らも、骨材の粒度、粒径によつて最適振動数はこととなるが、低振動数より、高振動数のほうが圧縮強度は高くなると述べ、セメントペーストを流動化<sup>52)</sup>するのは振動数を高くしたほうがよいと報告している。大石らも、振動数4500、7500および10000 vpmについて実験し、締め固め効果を十分にあげるには、まずセメントペーストの粘性をさげることが必要で、これにはできるだけ高振動数を与えることが必要で、ついで粗骨材が分離しない範囲で高い加速度をもつ振幅を定めるのがよいと述べている。

また、Crawley<sup>43)</sup>は、AEコンクリートを内部振動機で締め固めた場合、高振動数(13000 vpm)のほうが中振動数(6800 vpm)より空気量の損失が大きく、締め固め効果のよいことを指摘している。

英国の土木学会と構造学会の連合委員会の報告<sup>5)</sup>では、振動台は3000~6000 vpmが有効であると述べており、Washa<sup>8)</sup>のコンクリート製品の締め固め技術に関する報告によると、低振動数の場合は高振幅、高振動数の場合は低振幅がよいが、できれば高振動数のほうが望ましく、今後十分に基礎研究を行なう必要があるとしている。ACI Committee 609の報告<sup>23)</sup>では、内部振動機は7200 vpm以上の高振動数で低振幅のものの使用が推奨されている。なお、舗装コンクリート、大型スラブなどの締め固めに用いる表面振動機については、日本建設機械化協会の研究報告書<sup>29)</sup>によると、振動数4000 vpm、振幅1.5 mmが適当であると述べている。また、Kirkham<sup>42)</sup>らの表面振動機による舗装コンクリートの締め固めの研究によると、最良の締め固めは低振動数で大きい振幅のときにえられるのが、表面仕上げの面からは高振動数がよいと述べている。

### (3) 振幅について

振幅の影響について研究した結果はきわめて少ないが、Washa<sup>8)</sup>の指摘しているように、高振動数の振動台では低振幅、低振動数の場合には一般に高振幅のものを使用している。

Cusens<sup>7)</sup>は、電磁式振動台を用い、骨材粒度と単位セメント量が一定で水セメント比を変えた配合を用い、6000 vpmの振動数で振幅を変えて実験し、振動が有効に働くためには、振幅0.04 mm以上が必要であり、15 cm以上の深い打込みの場合は低振動数で高振幅とするのがよく、加速度6gの場合には振幅0.15 mm以上が必要になると述べている。Davis<sup>6)</sup>も、振幅が小さいと締め固め効果が劣ることを指摘している。Green<sup>9)</sup>の研究によると振動数が同じ場合、振幅を大きくすると強度は高くなっている。一方、Wadhwa<sup>11)</sup>らはある特定の振動数に対して締め固め効果が最大になる最適振幅があると報告している。

Schumann<sup>53)</sup>は、締め固め技術の実際問題について検討し、締め固めの際に振幅が大きいとまだ固まらないコンクリート中の中粒の骨材が比較的強い衝撃を受け、この粒径のものが分離を生じ易いので、高振動数では振幅を小さくするのがよいとし、振動数に対する振幅の適当な範囲



として、3000 vpmに対して1.00～1.60 mm、6000 vpmに対し0.25～0.40 mm、9000 vpmでは0.11～0.17 mmの値を推奨している。また、Kirkham<sup>42)</sup>らの舗装コンクリートについての研究によると、振幅が0.40 mmのとき振動の有効範囲は10～15 cm、1.60 mmでは約30 cmと有効範囲が大きくなり、振動加速度の影響は振幅より小さいと述べている。

#### (4) 加速度について

一般に、振動機による振動は単弦振動と考えられ、その最大加速度は次式で与えられ<sup>54)</sup>、振動数の2乗と振幅に比例し締固め効果ときわめて密接な関係がある。

$$\alpha_{\max} = 2\pi^2 a n^2 / 981 \dots\dots\dots (1.2.1)$$

ここに  $\begin{cases} \alpha_{\max} & : \text{最大加速度 (g)} \\ a & : \text{全振幅 (cm)} \\ n & : \text{振動数 (cycle/sec)} \end{cases}$

Kelek<sup>34)</sup>は、振動加速度はコンクリートの締固めに影響するきわめて重要な要素の一つであり、締固めの限界を示す最小加速度と最小振幅が存在し、振動数6000 vpmの場合ではこの値は1.5 gと0.04 mmであることを示している。Cusens<sup>7)</sup>によると、コンクリートの配合にもよるが、浅い打込みの場合、一般的には振動機の加速度を4 g以上にすることがよく、深い打込みでは6 g以上が必要であると述べている。Davis<sup>6)</sup>は、偏心重錘を取りつけた振動台を用い、PCはり用の富配合かた練りコンクリートの締固めについて研究を行ない、振動数や振幅より加速度が締固め効果をあげるのに大切な因子であり、20 gまでは加速度とともに圧縮強度は増加するが、12 g以上では増加率がゆるやかになると報告し、また、振動台は純すいに上下する鉛直線形振動のものより横方向の振動も加わった鉛直回転振動のほうが締固め効果はよいと述べている。Bergström<sup>36)</sup>の内部振動機による研究の結果でも、加速度を大きくすると振動の影響範囲は明らかに大となつたと述べている。Stewart<sup>51)</sup>も加速度が大きいほど締固め効果はよくなると述べており、馬場<sup>26)</sup>、Meissner<sup>55)</sup>なども振動加速度を振動数より重要視している。英国の土木学会と構造学会の報告<sup>5)</sup>では、振動機の加速度としては4～7 gが望ましいとしている。

岡田<sup>4)</sup>は、コンクリートの水セメント比と振動加速度との関係について研究し、水セメント比40%で6 g、50%で4 g、60%では2 gが限界加速度であり、この値以上で締固めを行なわないと最大強度のコンクリートはえられないと報告している。Barcelo<sup>56)</sup>は、60秒間締固めを行なう場合の振動機の加速度として、普通のワーカビリチーの川砂を用いたコンクリートで2 g、砕砂を用いたもの6 g、超かた練りコンクリートでは10 gの加速度が必要であるとしている。また、Schumann<sup>53)</sup>は、加速度は5～8 gが適当で、とくに振動台では加速度を重要視しなければならないと述べている。栗山<sup>33)</sup>も、セメントモルタル板の振動成形について実験し、振動数と振幅の一括できる加速度の効果を論じている。

#### (5) 振動締固め時間について

振動締固め時間は、他の要因と同様に締固め効果にきわめて密接な関係があり、実際のコンクリートの施工性あるいは製品の生産性と関連するきわめて重要な問題である。締固め時間が不十分であると、コンクリート中の気ほう排除が十分に進まないで、空げきが残る品質の向上が期待できないし、逆に長すぎると材料の分離を生じ、費用も要するので不利な結果を招くことになる。したがって、コンクリートの配合、ワーカビリチー、振動機の特性を考えて最適の締固め時間を選定しなければならない。

Kolek<sup>34)</sup>は、締固めの程度を示す締固め率と振動時間との関係を示す締固め関数としてつぎの式を与え、振動時間が締固め効果をあげるのにきわめて重要な要素であることを示している。

$$C_x = C_m - (C_m - C_o) \exp - [(\omega^2 a / g) t_x \cdot f w \cdot k] \cdots \cdots (1.2.2)$$

ここに、 $C_x$  : 任意時間  $t_x$  における締固め率

$C_o$  : 初期の締固め率

$C_m$  : 可能な最大締固め率

$t_x$  : 締固め時間

$f w$  : CF 試験や VB 試験によるワーカビリチーの関数

$\omega$  : 角速度 ( $= 2 \pi f$ )

$f$  : 単弦振動の振動数

$a$  : 単弦振動の振幅

$g$  : 重力加速度

$k$  : 定数、ディメンション [ $T^{-1}$ ]

同時に、加速度とワーカビリチーも重要であると述べ、振動時間を含めた3要素のうち、2つが決定されると必要な他の要素も決まってくるとしている。ワーカビリチーの悪いコンクリートでは加速度を大きくし、しかも振動時間を長くすることになる。<sup>7)</sup> Cusens は共振装置を用いて振動台での最適締固め時間を検討し、最適振動数 6000 ~ 7000 vpm に対して、締固め時間は2分という結果がえられている。

<sup>4)</sup> 岡田は、水セメント比のことなるコンクリートを2g、4gおよび6gの加速度で振動時間5~600秒の範囲で締固め、水セメント比の小さいコンクリートほど十分な強度をえるに要する締固め時間は長くなること、水セメント比の大きい場合は振動時間が長くなると材料分離を生じ、強度低下の傾向を示すが、これは加速度の大きいほど顕著であると述べている。さらに過振動についても研究し、長時間振動により材料分離の傾向がみられるが、水が上昇し排除されるため水セメント比が小となり過振動による強度の損失は比較的少なく、振動による空気の損失は連行空気よりも潜入空気のほうが早いことを報告している。<sup>27)</sup> 馬場の<sup>26)</sup> 紹介している英国の土木学会と構造学会の研究結果では、振動台を用いて加速度4gで締め固めた場合、それ以上の強度増加の期待できなくなる限界振動時間があり、その値は水セメント比40%のコンクリートで3分、50%では15秒、60%ではわずかに5秒となっている。

また、Wadhwa<sup>11)</sup> は、コンクリートの最適締固め時間は単位セメント量によつて影響されると述べ、富配合コンクリートでは貧配合コンクリートに比べてかなり短縮できる結果をえている。<sup>57)</sup> Walz は、外部振動機を用いた場合、10分までは振動時間の長いほど強度は大となる傾向があると述べている。

AEコンクリートの振動締固めによる空気の損失については、<sup>58)</sup> Higginson、<sup>45)</sup> Crawley、<sup>59)</sup> Backstrom らも研究している。<sup>60)</sup> Higginson は内部振動機による締固めの際の空気の損失について調べ、締固めの初期に大きいのが振動時間が長くなると小となり、この締固めによる気ほうの排除は強度的にみて有利であると述べている。<sup>61)</sup> Crawley は、締固めによる空気量の減少は、潜入空気のほうが大きいと述べており、Backstrom らは、空気量が少なくなるのは、気ほうの脱出のほか、大きい気泡が分裂して小さくなるためであると報告している。

<sup>60)</sup> Heaton は、内部振動機を用いた場合について、締固め時間を0~60秒にかえて研究し、振動時間を長くすると明らかに圧縮強度は高くなり、さらに耐久性が向上し、乾燥収縮は小さくなること、とくにワーカビリチーがよいとはだ面のよくなることを報告している。なお、<sup>44)</sup> Kaplan は、不完全締固めの際にできる空げきと圧縮強度低下率との関係を求め、空げき率15%までは、空げき率1%の増加に対して圧縮強度は5~6%、曲げ強度は4%低下するので十分に締固めを行なう必要のあることを指摘している。なお、<sup>61)</sup> 牧らは1:2モルタルを用い、

振動数 3 0 0 0 vpm、振幅 0.1 5 ~ 1.0 mm の振動台を用いて、1 0 秒から 1 0 時間にわたるきわめて長時間の締固めを行ない、材料の分離は著しいが、3 ~ 3.5 時間までは強度は高くなる傾向があると報告している。

#### (6) 型わくについて

型わくの材質や形状、寸法さらには振動機の取付け方法もコンクリートの締固め効果と密接な関係があるが、型わくの影響について研究した結果はきわめて少ない。

<sup>34)</sup> K o l e k は、高振動数で締め固める場合には、鋼製型わくが木製型わくより締固め効果がよく、振動機と型わくとの取付けが重要であると述べている。<sup>7)</sup> C u s e n s は、木製型わくは高振動数の場合、振動が吸収されるので、低振動数で高振幅とするのがよいとしている。また、<sup>53)</sup> S c h u m a n n は、型わくに外部振動機をいくつか取り付ける場合、干渉を生じ、このため振幅が大となり締固めがより効果的になると述べている。

振動台では上にのせる型わくの寸法によつて重量がことなるので、振幅や加速度が相違し、締固め効果がことなってくる。また、底面積に比べて高さが大きい形状のものでは打込み高さが大となるので、振動がコンクリート中を通過するとき吸収され締固め効果が小となる。<sup>7)</sup> C u s e n s は、深い打込みについて研究し、型わくの底面から高さ  $y$  の点の振幅  $x$  は次式のように指数的に減少することを示している。

$$X = X_0 e^{-By} \dots\dots\dots (1. 2. \quad 3)$$

ここに  $\left\{ \begin{array}{l} X_0 : \text{型わく底面の振動の振幅} \\ B : \text{減衰係数} \end{array} \right.$

型わくに接しているコンクリート面は振動の伝播がよいので、振動台で締め固める場合には浅い打込みの板状製品がもつとも有利である。

なお、内部振動機で P C はりのような大型製品を締め固める場合は、振動が吸収されるのでその伝播される有効範囲を考え、さし込み間隔を決めなければならない。内部振動機の振動の伝播に関しては、<sup>26)</sup> 馬場、<sup>36)</sup> Bergström、<sup>31)</sup> 神山らなどの研究があり、挿入間隔をあけ振動時間を長くするよりも、多少締固め時間は短くなつても、挿入間隔を密にするのがよいことが指摘されている。

## § 5. 結 語

コンクリートの振動締固め過程、締固め効果の判定方法、締固め効果におよぼす諸要因の影響などについて既往の研究結果をとりまとめ報告した。

とくに、締固め効果におよぼす振動数、振幅、加速度、振動時間などの諸要因の影響については研究者によつて多少ことなつた結果がえられている。すなわち、締固めの際にどの要因を重視するか、あるいは振動数についても高いほうが締固め効果のよいという高振動数説と逆の低振動数説とがあり、振幅や加速度についても種種の見解がある。締固め効果をあげるためには、かた練りコンクリートでは少なくとも加速度 4 g、振幅は 0.2 mm 以上は必要と思われる。研究者によつて結論が一致していないのは、使用している振動機の種類と特性値のことなること、使用材料やコンクリートの配合、コンシステンシー、型わくの形状、寸法などの相違するための影響と思われる。

振動数、振幅、加速度の組合せや、振動締固め時間をどの程度行なうかは、コンクリートのワーカビリティやコンシステンシーさらには経済性も考慮して決定しなければならない。

とくに、わが国においては振動台を用いた場合の締固めに関する研究結果はきわめて少なく、今後の製品工業の発展を考え、品質がよくしかも経済的なコンクリート製品をつくるためにも、使用材料と配合、ワーカビリティなどを考慮した最適の締固め条件、効果的な締固めのえられる振動機の開発、型わくの形状、寸法および材質の影響など、今後なお一層の調査、研究が必要と思われる。

### 第 3 章 振動数、振幅、加速度および振動時間の影響

#### § 1. 緒 言

コンクリート製品は、その製造の際に種種の機械的締固め方法が採用されているが、道路用、河海用などの小型の製品あるいは板状の製品では振動台がもつとも一般的に使用されている。

振動台によるコンクリートの締固めに関しては前章で述べたようにいくつかの報告があるが、わが国において公表された研究結果はきわめて少ない。また、研究者によつて締固め効果におよぼす要因に対する見解や最適の締固め条件はかなりこととなつており、使用材料や配合とも関連づけて今後研究を進める必要のあることを示している。

一方、製品工場では、その規模が比較的小さい場合、振動締固めは従来よりの経験に頼つてゐる傾向があり、一般に 3 0 0 0 ~ 5 0 0 0 vpm の振動数の振動台を用いてゐることが多いが、締固めはコンクリートの品質の良否や生産性と関係するきわめて重要な問題であり、今後、品質がよくしかも経済的なコンクリート製品をつくるためには、コンクリートのワーカビリティやコンシステンシーを考慮した最適の締固め条件について研究を進める必要がある。

したがつて、本章では、最大寸法 2 0 mm の川砂利を用い目標スランブを 3 種にかえたかた練りコンクリートについて、振動条件をかえて振動台で締固め成形し、その締固め効果におよぼす振動数、振幅、加速度および振動時間の影響について検討を行なつた。<sup>62)</sup>

#### § 2. 実験の概要

##### (1) 使用材料とコンクリートの配合

セメントは比重 3.16、28 日圧縮強さ 412 型の普通ポルトランドセメントを用いた。粗骨材は吉野川産で最大寸法 2 0 mm のものを 2 0 ~ 1 0 mm、1 0 ~ 5 mm の 2 粒度区分にふるい分け、粒度調整して使用した。細骨材も吉野川産のもので、5 ~ 1.2 mm 以下の 2 粒度区分にふるい分け、粗粒率が 2.72 になるように混合して用いた。

使用したコンクリートの配合は、道路用、河海用などの振動締固め製品を対象として、単位セメント量は 320 kg の一定とし、スランブの範囲は 0.5 ~ 1 cm、2 ~ 3 cm および 5 ~ 6 cm の 3 種のコンシステンシーとした（表 - 1.3.1 参照）。なお、粗骨材は表面乾燥飽水状態として用いたが、細骨材は空气中乾燥状態のものに有効吸水量を補正して使用した。

表 - 1.3.1 使用したコンクリートの示方配合

配合 No.	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (Kg/m <sup>3</sup> )					
						水 W	セメント C	細骨材 S		粗骨材 G	
								5~1.2mm	1.2mm以下	20~10mm	10~5mm
I	20	0.5~1	-	49.4	46	158	320	173	694	713	306
II	20	2~3	-	52.2	44	167	320	164	656	730	313
III	20	5~6	-	54.4	42	174	320	155	620	748	321

注) 成形温度、28℃

コンクリートの練りませには、写真 - 1.3.1 に示す容量 50 l の強制練りミキサ（山中シャフト KK 製 JET ミキサ）を用い、細骨材、セメントおよび水を投入して 1 分間でモルタルを練り、ミキサを止めて粗骨材を入れ、さらに 1 分間練りませを行なつた。練り板に排出してから、まだ固まらないコンクリートについて、スランブ試験、VB コンシストメーター（振動数 3600 vpm、振幅 0.2 mm、加速度約 1.4 g、以下 VB 装置という）による VB 試験などを行なつた。



供試体の成形には、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱形型わくを使用し、練りませ直後のコンクリートを一層に詰めた。

写真 - 1. 3. 1 強制練りミキサー

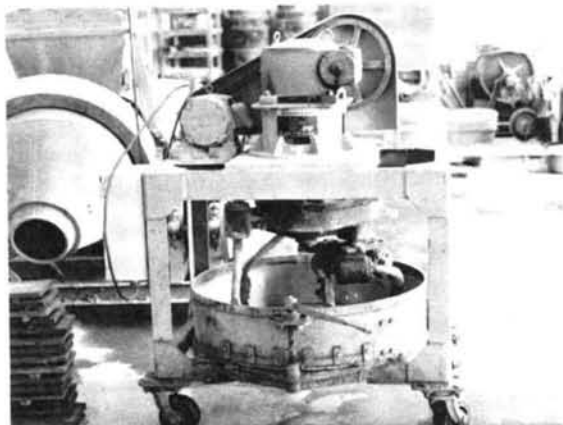
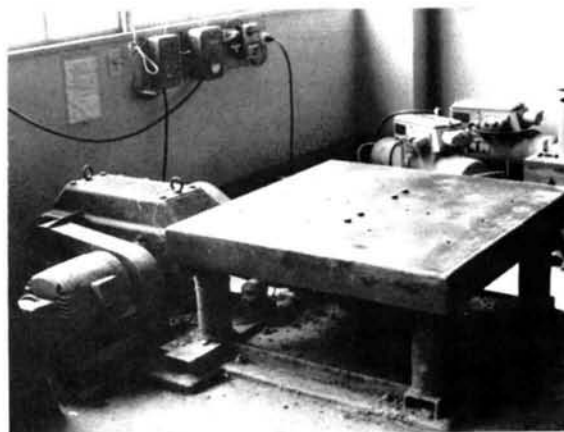


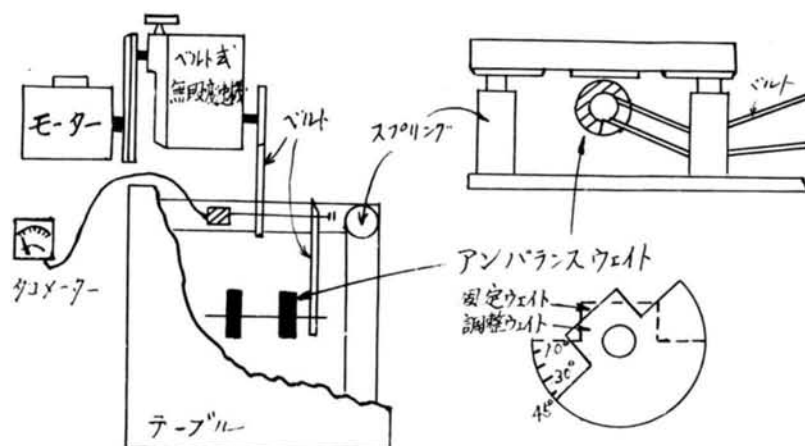
写真 - 1. 3. 2 振動台



## (2) 振動台と供試体の締固め成形

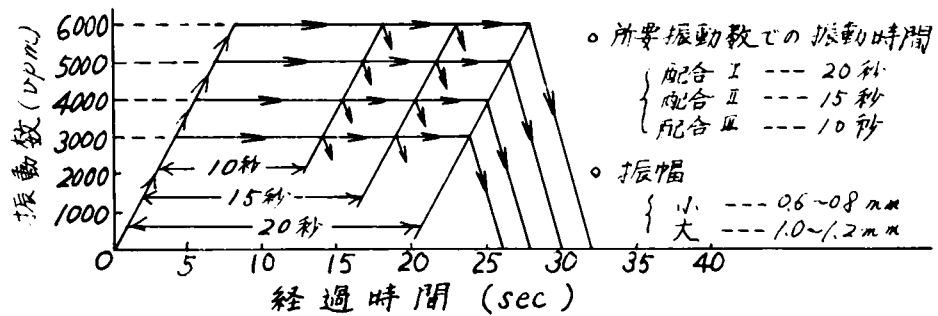
締固めに用いた振動台は、写真 - 1. 3. 2 に示す丸東製作所製の不平衡重錘式テーブル型バイブレーターで、振動数はベルト式無段変速機により 2000 から 6000 vpm まで手動により任意に変えることができ、振幅も偏心錘のウェイト角を調整し、0.5 から 1.5 mm まで変えることが可能である。なお、振動台の概略の機構を示すと図 - 1. 3. 1 のとおりである。この振動台の上にコン

図 - 1. 3. 1 使用した振動台の機構



クリートを盛込んだ $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱形型わく 2 個を鉄板とボルトで固定し、図 - 1. 3. 2 に示す振動締固め条件を用いて成形し、振動数、振幅および加速度の締固め効果におよぼす影響を調べた。すなわち、振動数は 3000、4000、5000 および 6000 vpm の 4 種類、振幅はウェイト角  $90^\circ$  と  $130^\circ$  とにかえ大 ( $1.0 \sim 1.2 \text{ mm}$ )、小 ( $0.6 \sim 0.8 \text{ mm}$ ) の 2 種を用いた。振動時間は、振動数の上げ、下げは手動ハンドルによるために加速と減速とに 6 ～ 12 秒を要するので、所定の最高振動数での締固め時間とし、予備成形の際の型わく中のコンクリート

図 - 1. 3. 2 成形の際の振動締固め条件



の締め固められる状態とくに表面の沈下と水の上昇、まだ固まらないコンクリートで求めた  $V B$  値、型わくの寸法などを考慮して、やや短か目であるが配合Ⅰのコンクリートで 20 秒、配合Ⅱでは 15 秒、配合Ⅲでは 10 秒とした。なお、振動加速度は  $4.2 \sim 18.5 g$  であり、加速、減速時間が加味され、しかも供試体寸法が小さいので、短時間の 10 秒でも締め固めは良好であり、配合Ⅲのコンクリートでは、表面に水が上昇し、飛散する傾向がみられた。

つぎに、振動時間が締め固め効果におよぼす影響を調べる場合には、3 種配合のコンクリートを用い表 - 1. 3. 2 に示すような条件で 5 ~ 120 秒の範囲内で振動時間を変えて検討した。

表 - 1. 3. 2 配合と最高振動数での振動締固め時間

配合 №	振 動 数 ( vpm )	振 幅 ( mm )	振動台の所定振動数での締固め時間 ( sec )
Ⅰ	5 0 0 0	1. 0	1 0 . 2 0 . 3 0 . 4 5 . 6 0 . 9 0 . 1 2 0
Ⅱ	5 0 0 0	1. 0	1 0 . 2 0 . 3 0 . 4 5 . 6 0 . 9 0 .
Ⅲ	5 0 0 0	1. 0	5 . 1 0 . 2 0 . 3 0 . 4 5 . 6 0 . 9 0 .

また、振動台の締め固め効果と比較するため、棒形振動機 ( 振動数 8 0 0 0 vpm、径 28 mm ) によつて締め固め成形した供試体も作成した。この場合も、 $\phi 10 \times 20$  cm の円柱形型わくの寸法が小さいので、振動時間は配合Ⅰで 15 秒、配合Ⅱで 12 秒、配合Ⅲでは 9 秒とし、あとで側面を木づちで数回軽くたたいた。

所定の締め固めを終つた供試体は  $21 \pm 1 \text{ deg}$  の恒温室に移し、数時間後セメントペーストで表面仕上げを行ない、翌日脱型し、材令 28 日まで  $20 \pm 2 \text{ deg}$  の水中で養生した。所定材令になつた供試体は水切り後、その重量を測定したのち 100 t 万能試験機を用いて圧縮強度試験を行なつた。

### § 3. 振動数、振幅と加速度との関係

一般に、振動機による振動はいずれも単弦振動と考えられる。振動台によつてコンクリートを締め固める場合、その振動台の振動数、振幅および加速度の関係を明らかにし、これらの要因の値によつて振動の効果を分析する必要がある。

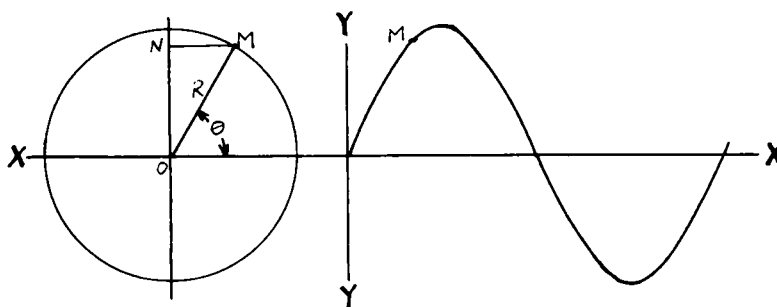
図 - 1. 3. 3 に示したように、質量  $M$  が一定の割合で  $O$  点のまわりを回転する場合に振動を生じるが、 $M$  の変位は  $Y - Y$  軸で、時間に関しては  $X - X$  軸に示される。 $M$  が射影される  $Y - Y$  軸上

の位置をNとすると、

$$ON = R \sin \omega t \dots\dots\dots (1.3.1)$$

ここに、 $\begin{cases} R : \text{回転半径} \\ \omega : 2\pi \times \text{回転数} (1/T) \\ t : \text{運動開始よりの時間} \end{cases}$

図 - 1.3.3 振動波の一般図



もし、任意の時間における変位をAとすれば、

$$A_{\max} = R \dots\dots\dots (1.3.2)$$

となり、単弦振動ではRを振幅と称している。速度は変位を微分した値であるから、

$$v = \frac{dA}{dt} = R\omega \cos \omega t \dots\dots\dots (1.3.3)$$

となり、最大値は  $\cos \omega t = 1$  のときにえられる。

$$v_{\max} = R\omega \dots\dots\dots (1.3.4)$$

速度曲線は変位曲線に似ているが  $90^\circ$  ずれて描かれる。振動加速度は速度を時間で微分したものとなるから、

$$a = \frac{dv}{dt} = -R\omega^2 \sin \omega t \dots\dots\dots (1.3.5)$$

で与えられ、その最大加速度は  $-\sin \omega t = 1$  のときに生じる。

$$a_{\max} = R\omega^2 \dots\dots\dots (1.3.6)$$

すなわち、 $\omega = 2\pi n$  で与えられるから、

$$a_{\max} = R(2\pi n)^2 = 4\pi^2 Rn^2 \dots\dots (1.3.7)$$

によつて最大加速度が求められる。したがつて、振動数、振幅および加速度のうち2つの要因が求まると他の1つも算出することができる。

この実験に用いた振動台については日本測器KK製の加速度振動計を用いて、型わく取付け位置における加速度と振幅とを実測し、振動数を求めた。

表 - 1.3.3 のように計算値は、振動台に取り付けられたタコメーターの値と大差はないので、実験誤差も考慮し、試験データはタコメーターの値を用いて整理を行なつた。

表 - 1. 3. 3 振動台の加速度、振幅の実測値と振動数

公称全振幅 (mm)	タコメーターの振動数 (vpm)	実測全振幅 (g)	実測加速度 (g)	振動数の計算値 (vpm)
1. 0	3 0 0 0	1. 2 1	6. 6	3 1 3 0
	4 0 0 0	1. 0 7	9. 6	4 0 2 0
	5 0 0 0	1. 0 2	1 3. 6	4 9 2 0
	6 0 0 0	0. 9 6	1 8. 5	5 8 7 0
0. 5	3 0 0 0	0. 7 7	4. 2	3 0 7 0
	4 0 0 0	0. 6 8	6. 0	4 0 2 0
	5 0 0 0	0. 6 1	8. 4	4 9 6 0
	6 0 0 0	0. 5 8	1 0. 8	5 8 7 0

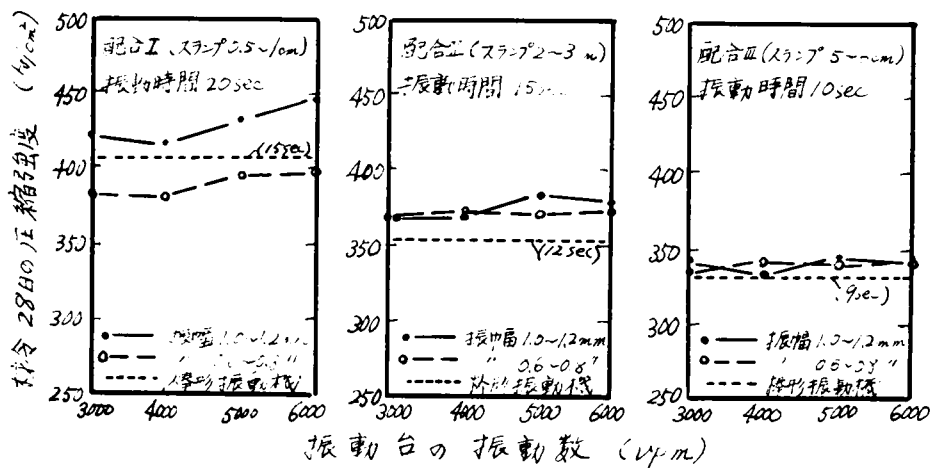
#### § 4. 実験結果とその考察

振動締め固め効果の判定には、前章で述べたように種種の方法があるが（p. 7 参照）、ここでは主としてコンクリートの品質判定の基準となつている材令 28 日の圧縮強度を用いて考察を行なつた。なお、供試体数は 1 種につき 3 本とした。その圧縮強度の変動係数は、ほとんどの値が 0. 2 ～ 6 % の範囲内であり、その平均値は 3. 2 % となつている。

##### (1) 振動数と圧縮強度について

コンシステンシーのことなる 3 種のコンクリートについてえられた材令 28 日の圧縮強度と振動台の振動数との関係を大、小 2 種の振幅の場合について図 - 1. 3. 4 に示す。この結果にみ

図 - 1. 3. 4 振動台の振動数と圧縮強度との関係



られるように、配合Ⅰのごくかた練りのコンクリートでは、振動数の低い場合には大差ないが、5 0 0 0、6 0 0 0 vpmと高い振動数で締め固めるにつれて強度は大となる。しかし、配合Ⅱ、Ⅲとコンシステンシーが大きくなると振動数の影響は小となる傾向がみられる。これは、単位水量が多くなると Powers<sup>63)</sup>の指摘しているように内部粒子引力を減少させ、ペーストの粘性が低下し、流動性がよくなるので低い振動数でも十分な締め固めが可能になるためと思われる。

##### (2) 振幅と圧縮強度について

振幅の圧縮強度におよぼす影響は、図 - 1. 3. 4 に示したように、ごくかた練りのコンクリー

トでは振幅が大きいほど明らかに強度は高いが、スランプ5～6 cmの配合Ⅲのコンクリートでは振幅の大小による締固め効果の差はほとんどみられない。図-1.3.5のように振動数によつて振幅の値は多少ことなっているが、振動数3000～6000 vpmの結果の平均強度を求め、この値と振幅の大小との関係を示すと図-1.3.6のとおりである。コンクリートがやわらかく

図-1.3.5 振動数と振幅

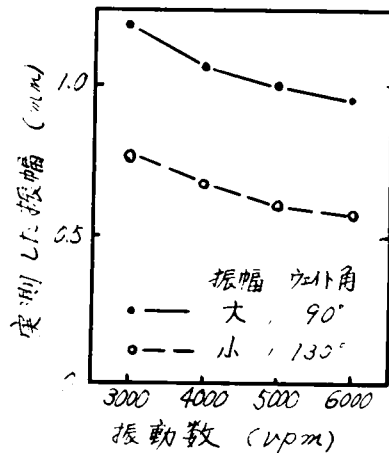
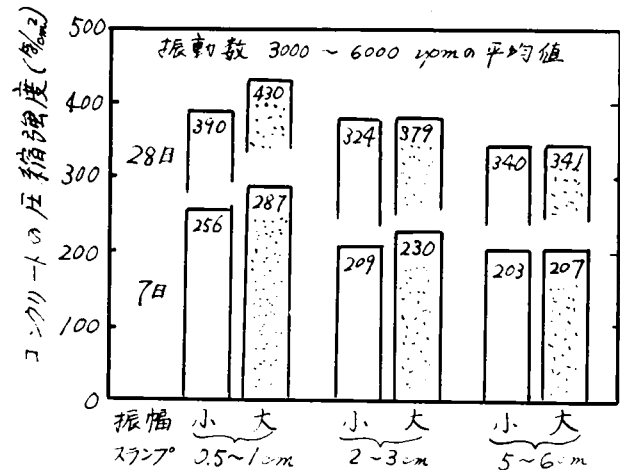


図-1.3.6 振幅の大小とコンクリートの圧縮強度



なると低い振動数でもよい締固め効果がえられることを示している。

また、棒形振動機を用いて締め固めたコンクリートの強度は、先の図-1.3.4にみられたように、最適締固め条件を用いると振動台の締固め効果がよいが、スランプの大きいコンクリートでは両者の差は小となる。

なお、配合Ⅰ、Ⅲのコンクリートは単位セメント量が同じであり、単位水量5 kgの低下に対して圧縮強度は30～40%増加している。したがって、経済配合を選定する上からは、振動機の締固め性能がよければできるだけかた練りの配合を用いるのが有利である。

### (3) 加速度と圧縮強度について

振動台の加速度は、振動数の2乗に比例して図-1.3.7に示すように増加し、締固め効果と きわめて密接な関係がある。円柱形型わくにコンクリートを詰め振動台に取りつけた場合の加速度の減少はごくわずかなので、取付け位置の値で整理し圧縮強度との関係を示すと図-1.3.8のとおりである。この結果にみられるように、加速度を大きくすると明らかに強度は高くなり締固め効果はよくなるが、コンシステンシーの大きいコンクリートではその影響はきわめて小さい。したがって、一般の振動締固め製品に用いられるようなスランプ3～7 cmのコンクリートでは、本実験によると5～13 gが適当であると考えられる。なお、英国の土木学会と構造学会の報告では、4～7 g<sup>5)</sup>を推奨している。

結局、本実験結果は最適締固め条件が使用するコンクリートのコンシステンシーによつてかなり相違することを示しており、やわらかいコンクリートになると振動数、振幅、加速度の相違の影響が小となり、低い値でもよい締固め効果がえられ、逆にかた練りコンクリートでは振動数、振幅、加速度などを高い目にしたほうが有利である。

図 - 1. 3. 7 振動数と加速度

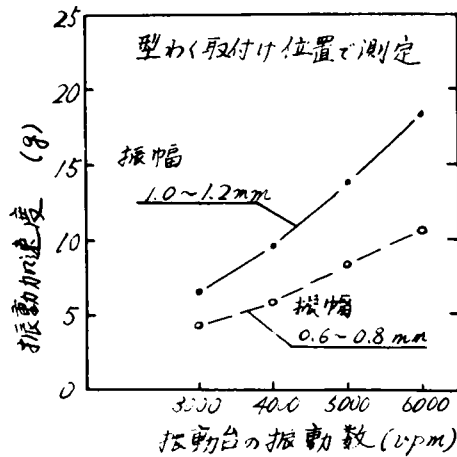
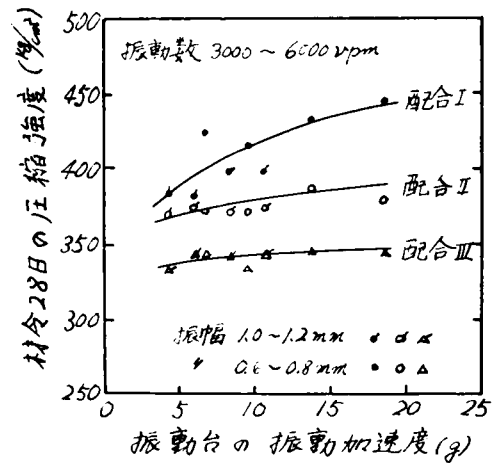


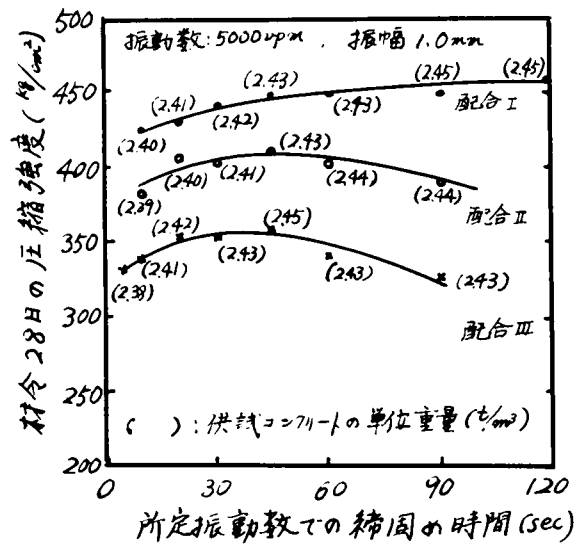
図 - 1. 3. 8 加速度と圧縮強度との関係



(4) 振動締め固め時間について

コンシステンシーのことなる3種のコンクリートについて振動数5000rpm、振幅1.0mmの条件で振動締め固め時間と圧縮強度との関係を求めると図-1.3.9のとおりである。ごくかた練りのコンクリートでは、振動時間が長いほど強度は高くなるが、コンシステンシーが大きくなると45秒の場合が最大で、60秒以上になるとむしろ強度低下の傾向を示している。

図 - 1. 3. 9 振動締め固め時間と圧縮強度との関係



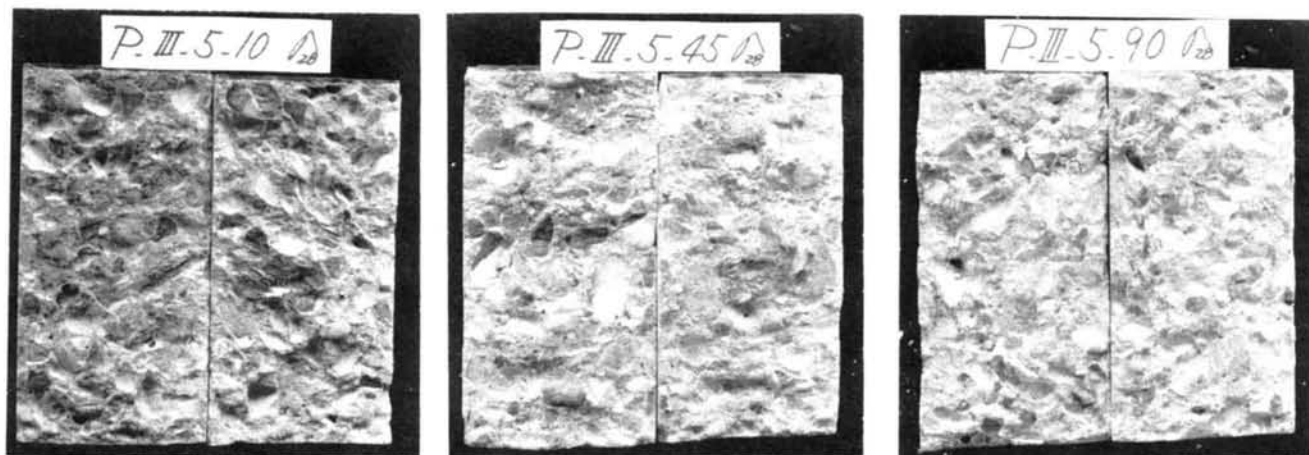
これは、供試体の切断面を示した写真－1.3.3にみられるように、振動時間が長くなると粗骨材が下方に多くなる傾向があり、材料分離の影響ではないと思われる。

図－1.3.3 振動時間を変えた場合の締固め断面の一例

(1) 10秒

(2) 45秒

(3) 90秒

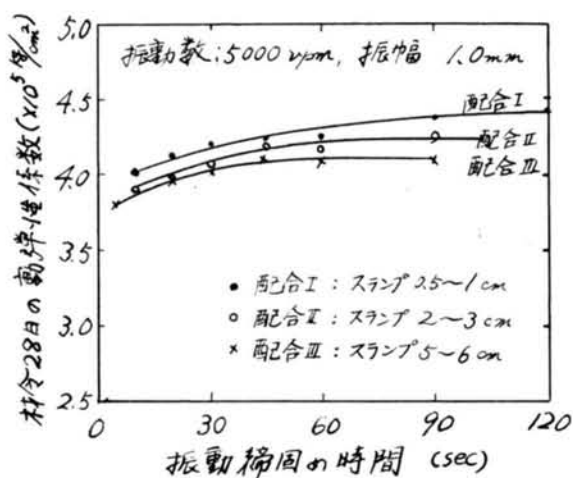


工場では、型わくの耐久性と使用頻度、製品の生産性を考慮すると、振動台の締固め時間は短いほど好都合であり、製品の形状、寸法などによっても多少相違すると思われるが、かた練りコンクリートで30～45秒、コンシステンシーの大きいワーカブルな配合ではさらに短縮が可能であると思われる。

なお、振動時間が長くなるとコンクリート中の空げき、気泡が少なくなるので、図－1.3.9の括弧内の数字に示したように、単位重量は明らかに大となる傾向がえられている。

コンクリートの動弾性係数はその品質と密接な関係があり、測定が簡単なので実験室における非破壊試験法としてよく用いられているが、<sup>(64)</sup>コンクリートの振動時間と動弾性係数との関係

図－1.3.10 振動時間と動弾性係数との関係



を示すと図-1.3.10のとおりである。スランブの大きいコンクリートでは、振動時間が60秒以上になるとその増進率は低くなるが、圧縮強度の場合のように低下の傾向がみられないのは、動弾性係数を求めるとき重量の積算されること、材料の分離が生じてその影響が強度の場合ほど大きくないことなどのためと思われる。また、動弾性係数の配合による差は、圧縮強度に比べて小となつてゐる。

一般に、振動締固めが進むとコンクリートの密度が大となるので、Kolek<sup>40)</sup>は密度で締固め効果を比較しているが、重量の積算される動弾性係数も、超音波法をともに非破壊試験によつて供試体の締固め効果を判定する場合の有効な方法であると思われる。Kaplan<sup>44)</sup>も、コンクリートの締固めが不十分で空げきが存在すると動弾性係数は低くなると述べており、品質判定の一つの目安になることを示している。

#### (5) 振動台によるコンクリートの締固め過程について

振動台による振動締固めは、振動エネルギーが型わくの底面からコンクリート中へ、上方に伝達されるしくみと考えられる。振動台に取付けた型わく中のコンクリートが振動時間の経過によつて締め固められる過程を詳細に観察すると、つぎの4つの段階にわけて考えることができる。

第1段階：コンクリート構成粒子の移動と沈下

第2段階：粒子の再配列と空げきの排除

第3段階：粒子のかみ合せの強化と組織の安定化

第4段階：材料の分離

まず、振動エネルギーがコンクリート構成粒子に伝えられるにつれて、ペーストが流動化し型わくのすみずみまでコンクリートが移動し、コンクリートの表面は沈下する。つぎに、粗骨材をモルタルが包み、締固めの進行とともに空げき、気泡が上方に押し出され排除される。

さらに、骨材粒子は自重と振動によつてより安定な位置におさまリ、粒子相互のかみ合せが進んで、緻密な組織がえられる。これは、締固め時間が長くなると単位重量が増加することでも明らかである。しかしながら、締固め時間がさらに長くなつてくると、粒径が大きく重量の重い粗骨材が下方に移行し、これに伴つてモルタル、ペースト、自由水などが上昇し材料分離の傾向を示す。

とくに、コンシステンシーの大きいコンクリートでは、微細なセメント粒子、砂の微粒子などを含む水が上昇し、その一部が型わくの上面から飛散する現象が観察される。

なお、振動締固めの各段階の持続時間はコンクリートの配合、締固め条件などによつてことなり、また、ある程度重なつて起こるので明確に区別することは困難である。コンクリートがやわらかくなると、第1、第2の段階はきわめて短くなり、スランブ5～6cmの場合では5秒前後と考えられる。

また、この振動台は横方向の変位が打消されておらず、鉛直回転振動を行なうので、単位セメント量の少ないかた練りではセメントペーストの粘性が高いために型わく中のコンクリートが回転する現象、いわゆるCusens<sup>7)</sup>の指摘している不規則な回転がみられ、振動数が低目のほうが、振幅が大きいほうが回転を生じやすい傾向がみられる。なお、Davis<sup>6)</sup>は、鉛直線形振動と鉛直回転振動との振動台による締固め効果を比較し、後者がむしろ締固め効果がよいと述べており、横方向の振動を打消す必要はないと思われるが、不規則な回転を生じると一度安定した組織が移動し、強度の伸びが頭打ちになる傾向があるので注意しなければならない。

## § 5. 結 語

川砂利を用いたかた練りコンクリートの振動締固め効果におよぼす振動数、振幅、加速度および振動時間の影響を振動数3000～6000vpmの振動台を用いて検討した本章の研究結果



を要約するとつぎのとおりである。

- (1) かた練りコンクリートの振動締固めには、棒形振動機よりも振動台の使用がより効果的であり、その最適締固め条件はコンクリートのコンシステンシーによつて相違する。
- (2) スランプ 0.5 ～ 1 cm のコンクリートでは、振動数 5 0 0 0 ～ 6 0 0 0 vpm で振幅 1.0 mm 前後、スランプ 2 ～ 3 cm および 5 ～ 6 cm のものでは振動数 4 0 0 0 ～ 5 0 0 0 vpm で、振幅 0.6 ～ 1.0 mm の条件で十分締固めが可能であり、コンクリートがやわらかくなると低い振動数でもよい締固め効果がえられる。
- (3) 振動加速度も締固め効果と密接な関係があり、ごくかた練りのコンクリートでは 1.3 ～ 2.0 g、スランプ 5 cm 前後のものでは 5 ～ 1.3 g の加速度が適している。
- (4) 振動締固め時間を長くすると密度が大となり、強度は高くなる傾向があるが、スランプの大きいコンクリートでは、振動時間を 60 秒以上にすると、材料分離の傾向を生じ、強度は伸びずむしろ低下の傾向を示す。
- (5) 最適振動数での締固め時間は、強度発現の様相と生産性を考慮すると 30 ～ 45 秒が適当であるが、ワーカブルなコンクリートになるとさらに短縮が可能である。
- (6) コンクリートの動弾性係数は振動時間が長くなると高くなり、ある程度締固め効果の比較ができる。しかし、圧縮強度に比べると配合による差が小さく、強度ほど敏感でない。

なお、本研究は小型供試体による結果であり、実際の工場では、寸法が大きくなるものが多く、製品の締め固まり具合をみて、振動数、振幅、加速度、振動時間などを決定しなければならない。とくに、振動数、振幅、加速度などの小さい場合は振動締固め時間を長くする必要がある。

## 第 4 章 砕石コンクリートの振動締固め

### § 1. 緒 言

近年、川砂利の不足によりコンクリート製品においても砕石が使用されるようになってきている。

通産省産業構造審議会骨材小委員会の調査<sup>65)</sup>では、昭和 46 年度においては骨材需要量の約 40 % を砕石でまかなわなければならないとしており、とくに大都市周辺では砂利の入手が困難となり、従来川砂利を用いた工場でも砕石を使用せざるをえなくなると思われる。

砕石を用いたコンクリートは川砂利コンクリートに比べて、

- ① コンクリートのワーカビリティが劣る。
- ② 同一スランブをえるのに単位水量を多く必要とする。
- ③ 骨材の空げき率が大となるので細骨材率が高くなる。

などの短所があるが、良質の A E 剤、減水剤などの使用によつて、これらの欠点も今日では問題にならなくなつてきている。

一般の土木建築工事に用いる砕石コンクリートについては従来より多くの研究が進められており、最近、日本コンクリート会議、建設省などで砕石の品質基準を作成するために、その調査を全国的に行ないその結果が調査報告書にまとめられている。<sup>66)</sup> 柳田は、<sup>65)</sup> これらの結果と既往の研究より、砕石の品質、砕石コンクリートの特性と使用方法などについて報告している。

しかしながら、最大寸法が小さく細骨材率の高いかた練りの製品用砕石コンクリートに関して公表された研究結果はきわめて少なく、砕石のコンクリート製品への適正な使用方法については今後十分に研究されなければならない。とくに、施工上の重要な問題の一つである締固めについては、形状の影響も考えられ、配合とも関連づけて研究を行なう必要がある。

したがつて、ここでは四国産の代表的な砕石を用い、かた練り砕石コンクリートの品質とくに強度<sup>67)</sup>および振動締固め条件の影響、高振動数締固め<sup>68)</sup>の<sup>67)</sup>に<sup>68)</sup>ついて実験的に検討し、最後に単位水量、単位セメント量、水セメント比などとコンクリートの関係<sup>69)</sup>を川砂利コンクリートと比較して調べ、かた練り砕石コンクリートの基礎的性質について考察を行なった。

### § 2. 振動締固め条件の影響

#### (1) 実験の概要

普通ポルトランドセメント（比重 3.14、28 日圧縮強さ = 41.3 ㎏/㎠）を用いた。使用した砕石は松山砕石および高知砕石の 2 種で、20 ~ 10 mm と 10 ~ 5 mm の 2 粒度区分にふるい分け、標準粒度範囲に入るよう粒度調整して用いた。なお、比較のために吉野川産の川砂利も用いた。これらの粗骨材の粒形の一例を写真 - 1.4.1 (1) ~ (3) に、品質試験結果を表 - 1.4.1 に示す。

なお、細骨材は吉野川産の川砂に徳島市沖の洲海岸の微砂を内割りで 10 % 混合して粗粒率を 2.83 としたものをを用いた。

コンクリートはスランブと単位セメント量をかえた表 - 1.4.2 に示す製品用配合を用い、強制練りミキサを用いて練り混ぜたのち、 $\phi 10 \times 20$  cm の円柱形型わくにつめ、前章で述べた振動台に同時に 3 個の型わくを取り付け、所定の締固めを行なった。

振動締固め条件は、振動数を 3000、4000、5000 および 6000 vpm（加速度は型わく取付け位置で 6.4、8.1、11.7 および 16.4 g）で振幅は振動数によつて多少こととなり、1.2 ~ 0.8 mm の範囲で振動数が高いほど小となつていく。所定振動数での締固め時間は、まだ固まらないコンクリートの V B 値（表 - 1.4.2 参照）、と前章の結果を参考にして、スラ

写真 - 1. 4. 1 使用した粗骨材の代表試料

(1) 松山砕石

(2) 高知砕石

(3) 吉野川砂利

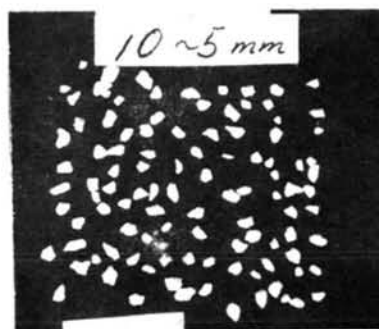
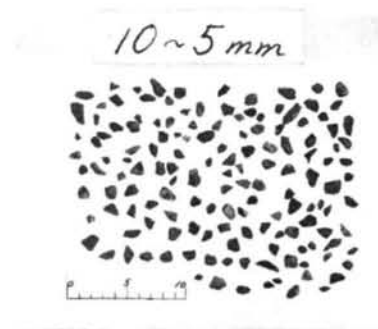
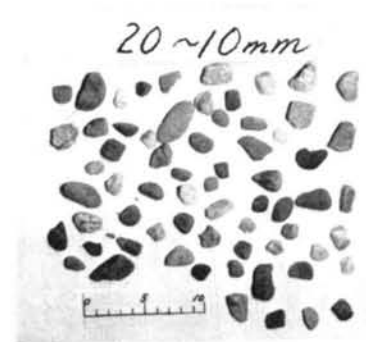
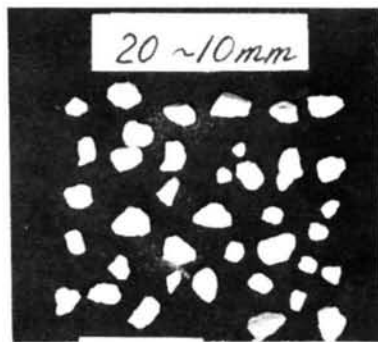


表 - 1. 4. 1 実験に用いた砕石と川砂利の試験成績

粗骨材の種類	岩種	* 最大寸法 (mm)	比重	吸水量 (%)	単位容積重量 (kg/m³)	粗粒率	粒形判定 実積率** (%)
松山砕石(M)	砂岩	20	2.62	0.92	1,560	6.60	60.0
高知砕石(K)	石岩	20	2.70	0.18	1,600	6.60	59.3
吉野川砂利(G)	砂岩片岩	20	2.61	1.28	1,670	6.66	64.7

\* 粒形別混合比；20～10mm：10～5mm＝7：3

\*\* JISA 5005 "コンクリート用砕石" によって求めた値

表 - 1. 4. 2 使用したコンクリートの配合

使用骨材	松山砕石(M)					高知砕石(K)					吉野川砂利(G)				
配合比	M-6	M-2	M-0	MA-2	MR-2	K-6	K-2	K-0	KA-2	KR-2	G-6	G-2	G-0	GA-2	GR-2
スランブの範囲(mm)	5~7	2~3	0~0.5	2~3	2~3	5~7	2~3	0~0.5	2~3	2~3	5~7	2~3	0~0.5	2~3	2~3
水セメント比(%)	58.4	55.0	51.3	51.9	42.9	56.9	53.4	50.0	50.3	41.4	53.1	50.6	45.9	46.6	38.6
細骨材率(%)	48.2	48.8	49.9	48.2	46.3	48.9	49.4	50.4	48.9	48.1	43.9	44.6	45.7	43.9	41.9
単位水量kg	187	176	164	166	179	182	172	160	161	174	170	162	147	149	162
単位セメント量kg	320	320	320	320	420	320	320	320	320	420	320	320	320	320	420
実測VB値	13	23	39	21	30	11	25	43	17	28	12	20	39	16	35

\* AEコンクリート、目標空気量 4.5%、ピンソルはセメント量に対し 0.04% 使用

\*\* コンクリートの成形温度、24～25℃

スラブ 5~7cm、2~3cm および 0~0.5cm のコンクリートに対して、それぞれ 10 秒、20 秒および 30 秒を用いた。

なお、比較のため JIS A 1132 “コンクリート強度試験用供試体の作り方” に準じて棒形振動機（直径 28mm、振動数 8000vpm）を用いて締固めを行なった供試体も作成した。この場合、振動時間はスラブ 0~0.5cm のコンクリートで 15 秒、2~3cm では 12 秒、5~7cm では 9 秒とし、1 層 1 カ所の挿入で締固めを行なった。

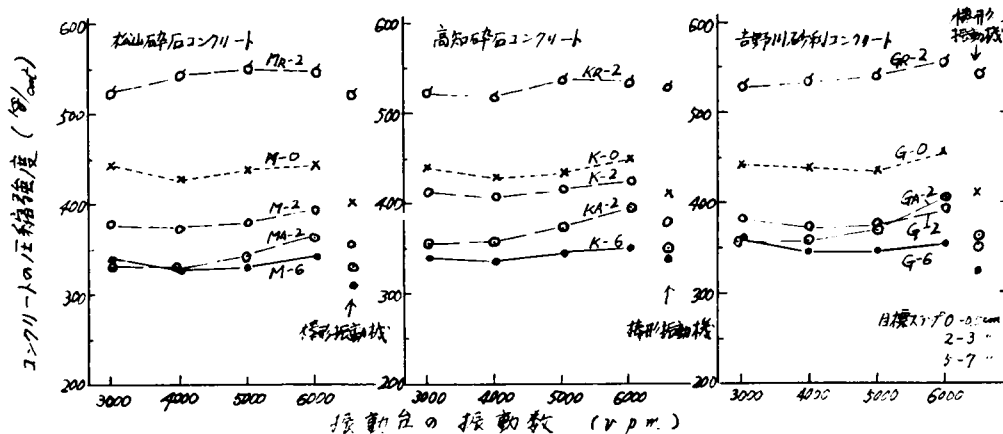
所定の締固めを行なった供試体は、表面仕上げを行なったのち翌日脱型し、材令 28 日まで水中養生を行なった。

所定材令で供試体の重量、一次共振周波数を求めたのち圧縮強度試験を行ない、主としてこの強度によって締固め効果の判定を行なった。なお、供試体 3 個の平均値をとったが、これらの変動係数は大部分の値が 6% 以内であり、その平均は 3.3% であった。

## (2) 実験結果とその考察

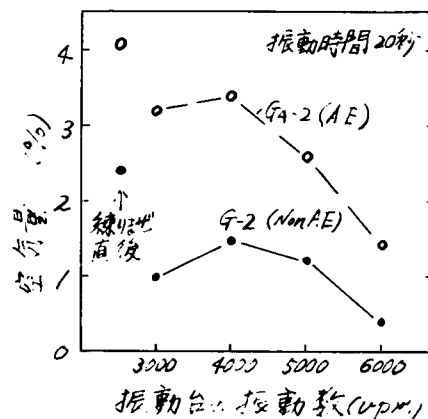
各種骨材を用いたコンクリートについて振動台の振動数と圧縮強度との関係を示すと図-1.4.1 のようになり、振動数による圧縮強度の差は大きくはないが、この振動台としては上限の 6000 vpm で締め固めた場合に強度はもっとも高くなる傾向がある。振動数が 3000 から

図-1.4.1 振動台の振動数と圧縮強度との関係



4000 vpm にかけて強度がほぼ同じか低下の傾向を示すものもあり 5000 vpm でも大差はないが、これは振動締固め中に型わく内のコンクリートに回転を生じ気ほう排除が十分に進まないためで、回転現象は振幅が比較的大きい振動数 4000 vpm のときに顕著になる傾向がみられている。これは、まだ固まらないコンクリートの空気量を測定するための 7ℓ の容器を振動台に取り付け、4 種の振動数でそれぞれ 20 秒間締固め、JISA1128 に示されている空気室圧力方法によって空気量を求めた結果でも明らかである（図-1.4.2 参照）。なお、Cusens<sup>7)</sup> は型わく中のコンクリートの不規則な回転は、小さい型わくの場合、振幅の大きい場合、細骨材

図-1.4.2 振動数とまだ固まらないコンクリートの空気量



の多いかた練りの場合に生じやすいと報告しており、Powers<sup>70)</sup>も振幅が過大のとき型わくの中で回転しやすいと述べている。

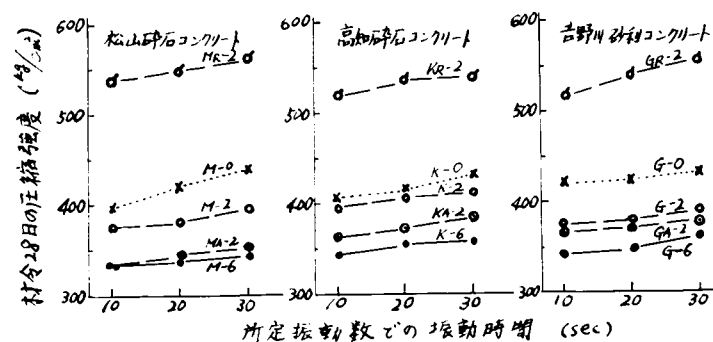
富配合コンクリートやAEコンクリートでも振動数増加により強度は高くなり、とくに後者は高振動数の6000 vpmを用いると締固め効果がよくなっている。これは、気ほうの排除が進み、またBackstromら<sup>59)</sup>の指摘しているように大きい気ほうが攪乱によってゆがめられ分裂するために空気量の減少がブレンコンクリートより顕著になるためと思われる(図-1.4.2参照)。

砕石コンクリートと川砂利コンクリートの振動数と圧縮強度との関係を比較すると、その傾向はほぼ同様であるが、川砂利ではスランブが大きくなると高振動数の6000 vpmで締め固めてもその効果はあまりみられない。これは前章で述べた結果とよく一致している(p. 18参照)。

なお、最適振動数を用いると振動台で締め固めたコンクリートの強度が、棒形振動機で締め固めた場合に比べて図-1.4.1に示したように明らかに大となっているが、富配合コンクリートになるとその差は小となっている。

つぎに、振動台の振動数を5000 vpmとし、その振動数での振動時間を10、20および30秒の3種にかえて振動締固め時間と圧縮強度との関係を求めた。図-1.4.3にみられるよう

図-1.4.3 振動台の振動時間と圧縮強度との関係



に、30秒までの結果ではあるが振動時間を長くするとコンクリートの圧縮強度は増加する傾向を示している。なお、この振動台は加速と減速は手動式なので、振動数5000 vpmでは加速と減速の時間は約10秒となっている(図-1.3.2、p. 16参照)。

なお、本実験では前章で述べた振動台式のVB装置によるVB値を参考にしたため振動締固め時間を短くしたが、さらに振動時間を長くした場合について研究する必要があり、次節では90秒までの振動時間の影響を調べた。

### § 3. 各種混和材料を用いたコンクリートの振動締固め

#### (1) 実験の概要

普通ポルトランドセメント(比重=3.15、28日圧縮強さ=416 kg/cm²)を用い、粗骨材は最大寸法20mmの徳島県鳴門市大麻町産の鳴門砕石(大麻砕石ともいう)と吉野川砂利、細骨材は粗粒率2.81の吉野川砂を使用した。鳴門砕石は写真-1.4.2に示すような形状のもので、岩種は砂岩である。使用した粗、細骨材の物理試験成績は表-1.4.3のとおりである。

写真-1.4.2 実験に用いた鳴門砕石

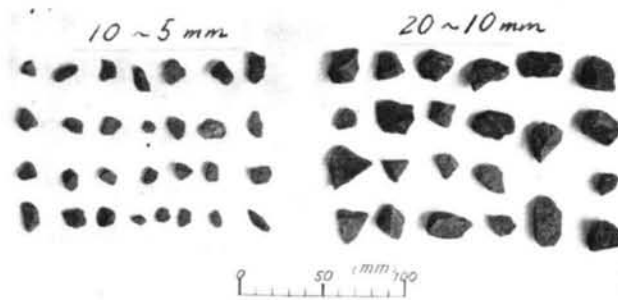


表-1.4.3 使用骨材の品質

骨材の種類	ふるいを通るものの重量百分率										粗粒率 (FM)	比 重	吸 水 量 <sup>(%)</sup>	粒形 判定 <sup>(%)</sup>	実積 率 <sup>(%)</sup>	有物機 試不純 驗
	20 <sup>高</sup>	15 <sup>高</sup>	10 <sup>高</sup>	5 <sup>高</sup>	2.5 <sup>高</sup>	1.2 <sup>高</sup>	0.6 <sup>高</sup>	0.3 <sup>高</sup>	0.15 <sup>高</sup>							
鳴門砕石(N)	100	85	35	4	0	0	0	0	0	6.61	2.60	1.28	59.5	—		
吉野川砂利(G)	100	86	35	2	0	0	0	0	0	6.63	2.61	1.30	64.7	—		
吉野川砂	100	100	100	100	92	73	44	9	1	2.81	2.62	1.16	—	合格		

コンクリートの配合は表-1.4.4 に示すように、前実験と同様の単位セメント量とし、目標

表-1.4.4 使用したコンクリートの配合

粗骨材の種類	砕 石										川 砂 利			
配合の種類	NP-6	NP <sub>R</sub> -6	NF-6	NA-6	NA <sub>R</sub> -6	NM-6	NP <sub>O</sub> -6	NP-2	NA-2	NM-2	GP-6	GP <sub>R</sub> -6	GA-6	GA <sub>R</sub> -6
目標スランブ(cm)	6±1	6±1	6±1	6±1	6±1	6±1	6±1	2±1	2±1	2±1	6±1	6±1	6±1	6±1
水セメント比(%)	53.6	56.9	53.1	51.6	40.0	50.0	53.1	53.1	47.8	46.3	46.0	39.3	46.2	46.0
細骨材率(%)	49.6	47.2	49.7	48.8	46.2	49.2	50.4	50.5	49.8	50.1	44.6	41.9	43.8	41.1
単位水量(g)	180	181	170	160	168	160	170	170	153	148	163	165	148	150
単位セメント量(kg)	320	420	320 (256)	320	420	320	320	320	320	320	320	420	320	420
混和材料の使用量	プレーン	プレーン	フライ アッシュ 64kg	ビンソル 128cc	ビンソル 189cc	モール MX 320cc	ポリリス No100N 960cc	プレーン	ビンソル 144cc	モール MX 480cc	プレーン	プレーン	ビンソル 128cc	ビンソル 160cc
実測VB値(sec)	19	23	24	18	19	20	22	41	35	44	17	21	18	22

単位粗骨材容積：砕石=0.599, 川砂利=0.619, 成形温度：15~18℃

スランブは6cmと2cmとの2種とした。混和材料は、混和材としてフライアッシュ(表-1.4.5 参照)、AE剤として代表的なビンソル、減水剤としては製品用を対象としてモールMX(リグ

表-1.4.5 フライアッシュの試験成績

試験項目	化 学 成 分 (%)			物 理 的 性 質			
	湿 分 (%)	強熱減量 (%)	シリカ (%)	粉 末 度		比 重	単位水量比 (%)
				比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	44μ残分 (%)		
試験結果	0.12	1.3	58.7	3370	8.6	2.16	96
JIS規格	1以上	5以下	45以上	2700以上	25以下	1.95以上	100以下

ニンスルホン酸系、空気連行性あり）およびボソリスル<sub>6</sub>100N(陰イオン系表面活性剤、主成分はポリオール複合体、空気連行性なし)を使用した。

振動台は前述した6000 vpmまでの低振動数用振動台のほかに写真-1.4.3に示す日本ワッカーKK製で振動数7200 vpm(実測振幅0.28mm、加速度8.3g、計算振動数7280 vpm)の不均衡重錘式の高振動数用振動台も用いた。これは、外部パイプレーター(ARFM08/42型)を取り付けた振動台と3相周波数電圧コンバーター(FU5Z/42型、写真-1.4.4参照)とを連結し、所定の振動数をえるもので、連続的に振動数をかえることはできない。しかし、他のパイプレーターとコンバーターとの組合せによって7200 vpmのほか5400、10800および14400 vpmの振動数もえることができる。

写真-1.4.3 高振動数用振動台

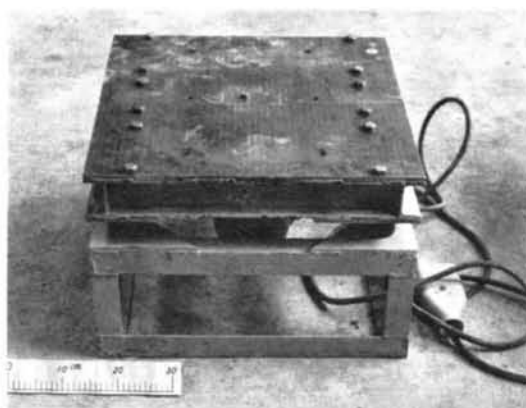
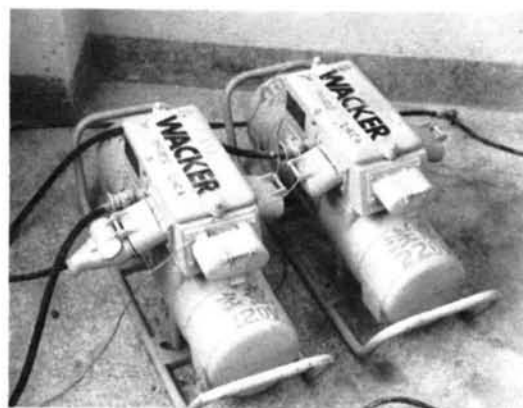


写真-1.4.4 コンバーター



強制練りミキサを用いて2分間練りまぜを行なったのち、 $\phi 10 \times 20$  cmの円柱形型わくにコンクリートを詰め、低振動数用の振動台では3000、4000、5000および6000 vpmの4種、高振動数用振動台では7200 vpmの振動数を採用し、最高振動数での振動時間を20秒として締め固めを行なった。なお、振動締め固め時間の影響を調べる場合には、振動台の振動数を5000 vpmとし10、20、30、45、60 および90秒の振動時間、比較のため8000 vpmの棒形振動機では時間が長くなるとモルタルが中央部に集るので10、20および30秒とした。

締め固めを終えた供試体は脱型後標準養生し、材令28日でコンクリートの単位重量、一次共振周波数を求めたのち圧縮強度試験を行なった。なお、前実験と同様に3個の平均値で強度を求めた。測定値142個の中で変動係数7%をこえるものは6個あったがキャッピング不良、かけ、など明らかに欠陥のあったものは除外した。変動係数の平均は3.2%である。

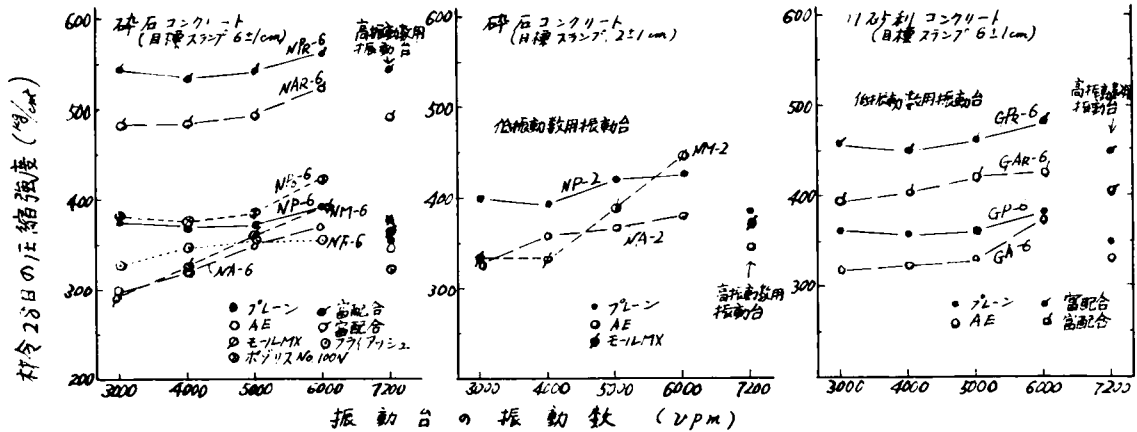
## (2) 実験結果とその考察

### 1) 振動数の影響について

図-1.4.4にみられるように、混和材料を用いないブレンコンクリートでは、振動数3000~4000 vpmで強度はほぼ同程度か低下の傾向を示すものがあるが5000~6000 vpmになると強度は高くなる。混和剤を用いたコンクリートは4000から6000 vpmへと振動数による強度増加の傾向が著しく、振動数が高くなるとAEコンクリートとブレンコンクリートとの強度差が小となり、良質の減水剤を用いたものではブレンより強度は高くなっている。良質のAE剤や減水剤を用いると砕石コンクリートのワーカビリティも改善されるし、施工上きわめて有利である。Powers<sup>71)</sup>は、表面活性剤を用いると内部粒子引力を減じ、ペーストの流動性を高めることを指摘している。なお、フライアッシュを用いたコンクリートでは、振動数による強度の伸びは、混和剤を用いた場合ほど顕著でない。

また、高振動数用振動台で7200 vpmで締め固めた場合には振幅が0.28mmと小さくな

図-1.4.4 各種混和材料を用いたコンクリートの強度におよぼす振動数の影響



るため、その加速度も小となり、振動数の高い割合には締固め効果は低く、加速度がほぼ同程度の低振動数用振動台の4000 vpmで締め固めた結果とほぼ同じ値であり、Kolek<sup>34)</sup>その他の研究者によって指摘されているように振動加速度が締固め効果と密接な関係のあることを示している。短時間で締固めをよくするには加速度を大きくするのが有利と考えられるが、さらに高振動数を用いた場合の締固め効果については次節で検討を行なった。

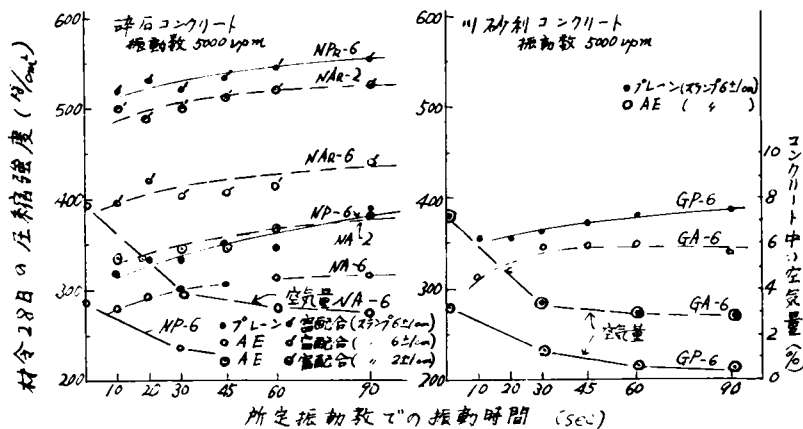
なお碎石コンクリートと川砂利コンクリートとの強度を比較すると、単位セメント量320 kgの場合はほぼ同様であるが富配合になると各振動数の場合でも明らかに前者が大である。

結局、低振動数用振動台では、混和材料を用いたコンクリートでも5000~6000 vpmの振動数を用いるのがよく、良質のAE剤や減水剤を用いた場合には、とくに6000 vpmでの締固めが効果的であるといえる。

## 2) 振動時間の影響について

ブレンおよびAEコンクリートについて振動台の振動締固め時間と圧縮強度との関係を示した図-1.4.5にみられるように、振動時間の増加とともに圧縮強度は明らかに増すが、AEコンクリートはブレンコンクリートに比べて20~30秒における強度増加率が大きく、

図-1.4.5 振動台の振動締固め時間と圧縮強度との関係



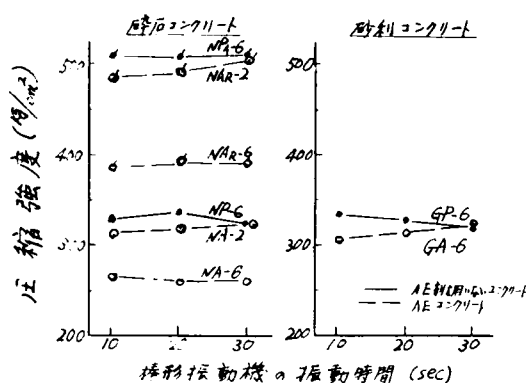


ブレンコンクリートより振動時間をいくぶん短くすることができる。これは、エアメーターを振動台に取り付け、単位セメント量320 Kg、目標スランプ6 cmのコンクリートについて振動時間をかえて空気量を測定した結果（図－1.4.5 参照）にみられるように、AEコンクリートでは30秒までの空気量の減少がいちじるしいためと思われる。これには、空気が上昇し脱出するほか、締固めの際に働く粒子のせん断力によって大きい気ほうより小さい気ほうに分裂することも考えられる。Backstrom<sup>59)</sup>は気ほうが分裂する理由は、振動による攪乱によって気ほうがゆがめられ水と空気との界面の面積が増大することから、2つの気ほうにわかれやすくなると述べている。なお、AEコンクリートおよびブレンコンクリートのそれぞれ30秒までに排除される空気量から判断して、初期にはエントラップドエアの脱出のほかエントレインドエアもかなり減少していると考えられる。

つぎに、図－1.4.5の結果より、砕石コンクリートは川砂利コンクリートに比べて振動時間を長くした場合の強度の増進率がやや高いので、締固め時間をいくぶん長くするのがよいといえる。これは、川砂利は骨材粒子が丸味をおびているので振動の伝播がよく、Pouch<sup>49)</sup>erの指摘しているようにコンクリートのムーバビリティー（可動性）もよいが、砕石は角ばっているため、粒子のかみ合せと組織の安定化の過程が長くなるためと思われる。

棒形振動機で締固めを行なった場合は、図－1.4.6にみられるように、振動時間を10秒から20秒、30秒と長くしても圧縮強度はほぼ同様であり、長くする効果はほとんどみら

図－1.4.6 棒形振動機の振動時間と圧縮強度

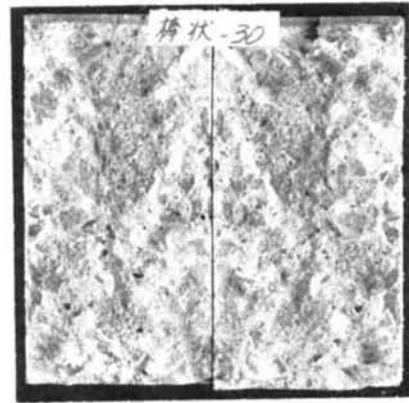
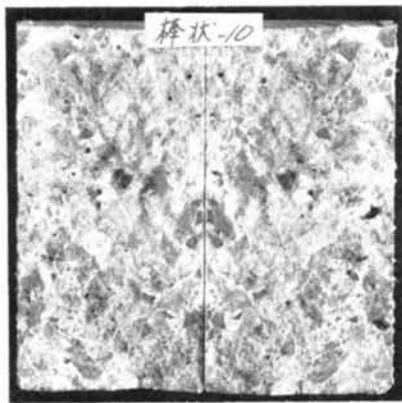


れない。これは、 $\phi 10 \times 20$  cmの小型の円柱形型わくの中央に、直径28 mmの振動棒を入れると、振動加速度は実測23g(全振幅0.66mm)と大きく、きわめて短時間に振動が伝播されて効果的な締固めの行なわれるが、時間が長くなると振動棒の周囲にセメントペーストあるいはモルタルが集まって分離気味となるので、振動時間を長くしても強度はよこばい状態の結果を示すものと考えられる（写真－1.4.5 (1)、(2) 参照）。

写真 1.4.5 棒形振動機で締め固めた碎石コンクリートの断面の一例

(1) 振動時間 10 秒

(2) 30 秒 (配合 NA-6)



### 3) 動弾性係数、単位重量などによる締め固め効果の判定

振動数を高くしたり振動時間を長くして締め固めを行なったコンクリート供試体で、その動弾性係数を求めると図-1.4.7 および図-1.4.8 にみられるように振動数や振動時間の増加とともに弾性係数も大きくなり、この値によつてもある程度締め固め効果の判定が可能であることを示している。なお、動弾性係数( $E_D$ :  $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ )と圧縮強度( $\sigma_c$ :  $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ )との関係を求める

図-1.4.7 碎石コンクリートの振動数と動弾性係数との関係

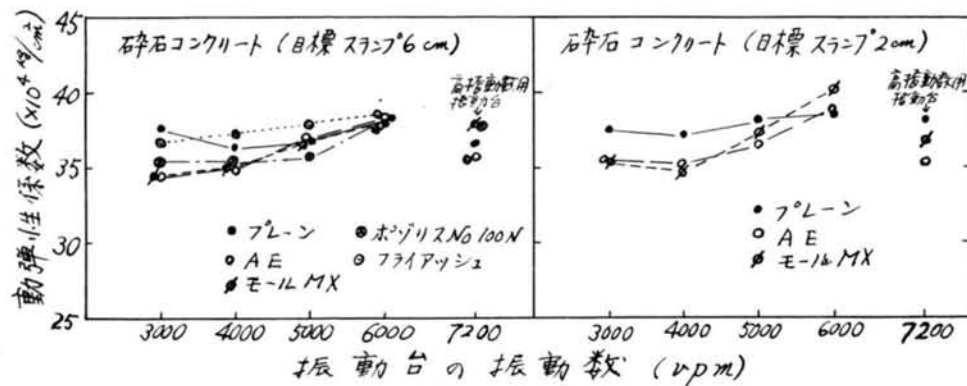
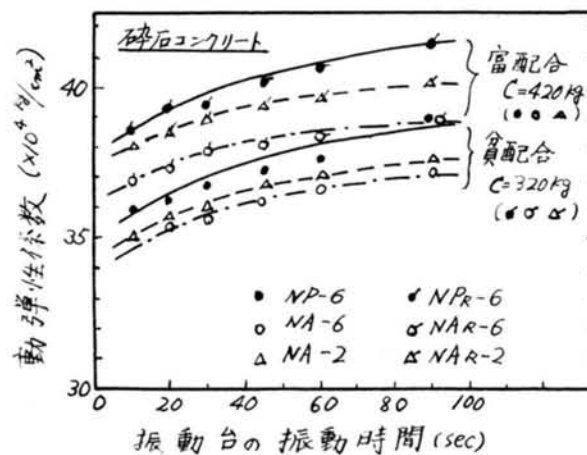


図-1.4.8 振動台の振動時間と動弾性係数との関係

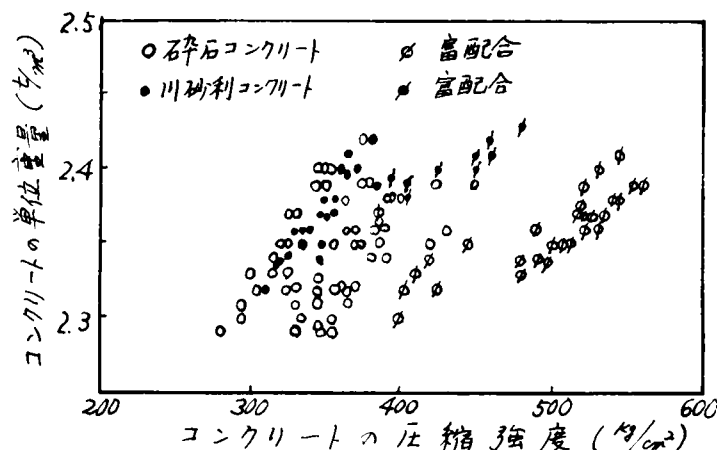


とつぎの指数式で示される。

$$\begin{aligned} \text{鳴門砕石} : E_D &= 10.45 \sigma_c^{0.214} \times 10^4 \dots\dots\dots (1.4.1) \\ \text{吉野川砂利} : E_D &= 5.92 \sigma_c^{0.320} \times 10^4 \dots\dots\dots (1.4.2) \end{aligned}$$

Kolek<sup>34)</sup>はコンクリートの単位重量で締固め効果の判定が可能であると報告しているが、小型供試体では締固め条件による重量差が少なく、また、図-1.4.9にみられるように、重量の増加とともに強度は大となる傾向があるが、ばらつきがかなり大となっている。したがって、単位重量は一つの目安にはなるが、締固め効果の判定基準とするにはやや無理があるように思われる。しかし、振動数や振動時間を増して十分な締固めを行なうとコンクリート

図-1.4.9 コンクリートの単位重量と圧縮強度



中の空けきが排除され、単位重量が大となる傾向があるし、同一配合の場合にはばらつきも小さいので、コンクリート製品工場でブロック類、小型の道路用製品などの品質の管理、締固めの良否の判断には、単位重量あるいは製品重量による判定方法は、破壊しなくてもよいし、かなり有効なものと考えられる。

#### § 4. 高振動数締固めの効果について

##### (1) 実験の概要

振動台の締固め効果におよぼす振動数の影響については既往の研究で述べたように高振動数がよいという説と、<sup>9)10)11)</sup>6000 vpm までの低振動数がよいという報告とがあり意見がわかれている。Kolek<sup>34)</sup>は高振動数で締固めたほうがはだ面はよいと述べている。また、Kirkham<sup>42)</sup>らは舗装コンクリートを表面振動機で締め固める場合、低振動数で振幅が大きいほど締固め効果はよいが、表面仕上げの点からは高振動数がよいと報告している。わが国では、高振動数振動台の締固めは大石ら<sup>52)</sup>のごく最近の報告以外研究結果がなく、また実際の製品工場でも低振動数で比較的高振幅の振動台を用いている例が多く、高振動数締固めの効果については、使用する骨材や混和材料などの配合と関連づけて今後十分に検討しなければならない。

したがって、ここでは砕石および川砂利を用い、フライアッシュ、AE剤、減水剤、収縮低減材などの各種混和材料を使用したコンクリートを高振動数と低振動数の2種の振動台を用いて締固め成形し、圧縮強度を調べ、比較検討を行なつた。

セメントは普通ポルトランドセメント（比重＝3.15、28日圧縮強さ＝41.4 kg/cm<sup>2</sup>）を用い、骨材は前節で述べたと同様の最大寸法20mmの鳴門砕石、吉野川砂利と粗粒率2.81の川砂を

使用した。混和材料は、フライアッシュ（表－1.4.5、p. 28 参照）のほか、A E 剤としてビンソル、減水剤としてモール M X、ボゾリス No. 100 N およびルブリリス L を用いた。ルブリリス L は特殊な有機高分子化合物と界面活性剤を主成分とする可塑剤に属する混和剤で空気を連行しないタイプである。また、収縮低減材はセッコウと炭酸カルシウムを主成分とするジブトン（比重＝2.80）を用いた。ブレンおよび各種混和材料を用いたコンクリートの配合を表－1.4.6 に示す。

コンクリートの締固め成形には、すでに述べた丸東製作所製の低振動数の振動台（2000～6000 vpm）と日本ワッカー KK 製の高振動数の振動台（7200、10800 vpm）とを用い、前者で振動数 5000 vpm（加速度 11.7 g）と 6000 vpm（16.4 g）、後者で 7200 vpm（8.3 g）と 10800 vpm（18.0 g）の振動条件を採用した。型わくは  $\phi 10 \times 20$  cm の円柱形のものを使用し、低振動数用振動台で 1 度に 3 個、高振動数用振動台では 2 個をテーブルに固定し、それぞれ所定振動数で 20 秒間締固めを行なった。

表－1.4.6 使用したコンクリートの配合

骨材の種類	鳴門砕石（砂岩）							吉野川砂利（砂岩、片岩）						
配合の種類	OP-5	OA-5	OM-5	OPo-5	OL-5	OF-5	OG-5	GP-5	GA-5	GM-5	GPo-5	GL-5	GF-5	GG-5
目標スランプ（cm）	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
目標空気量（%）	-	4.5	4.5	2.0	-	-	-	-	4.5	4.5	2.0	-	-	-
単位水量（kg）	191	173	172	182	176	181	184	172	157	156	166	160	165	169
単位セメント量（kg）	300	300	300	300	300	240	285	300	300	300	300	300	240	285
水セメント比（%）	64	58	57	61	59	60	61	57	52	52	55	53	55	56
細骨材率（%）	47	47	47	47	47	45	46	43	43	43	43	43	41	42
混和材料の使用量	ブレン —	ビンソル 120cc	モール M X 360cc	ボゾリス No.100N 900cc	ルブリリス L 750cc	フライ アッシュ 60kg	ジブトン 15kg	ブレン —	ビンソル 120cc	モール M X 360cc	ボゾリス No.100N 900cc	ルブリリス L 750cc	フライ アッシュ 60kg	ジブトン 15kg

（注）コンクリートの成形温度 28℃の配合

締固め成形後、恒温室に移し、翌日脱型してから  $20 \pm 2$  deg の水そうで養生した。材令 28 日で動弾性係数を求めたのち圧縮強度試験を行なった。なお、供試体数は 5000 vpm と 6000 vpm はそれぞれ 3 個、7200 vpm と 10800 vpm はそれぞれ 4 個とし、平均値を求めた。

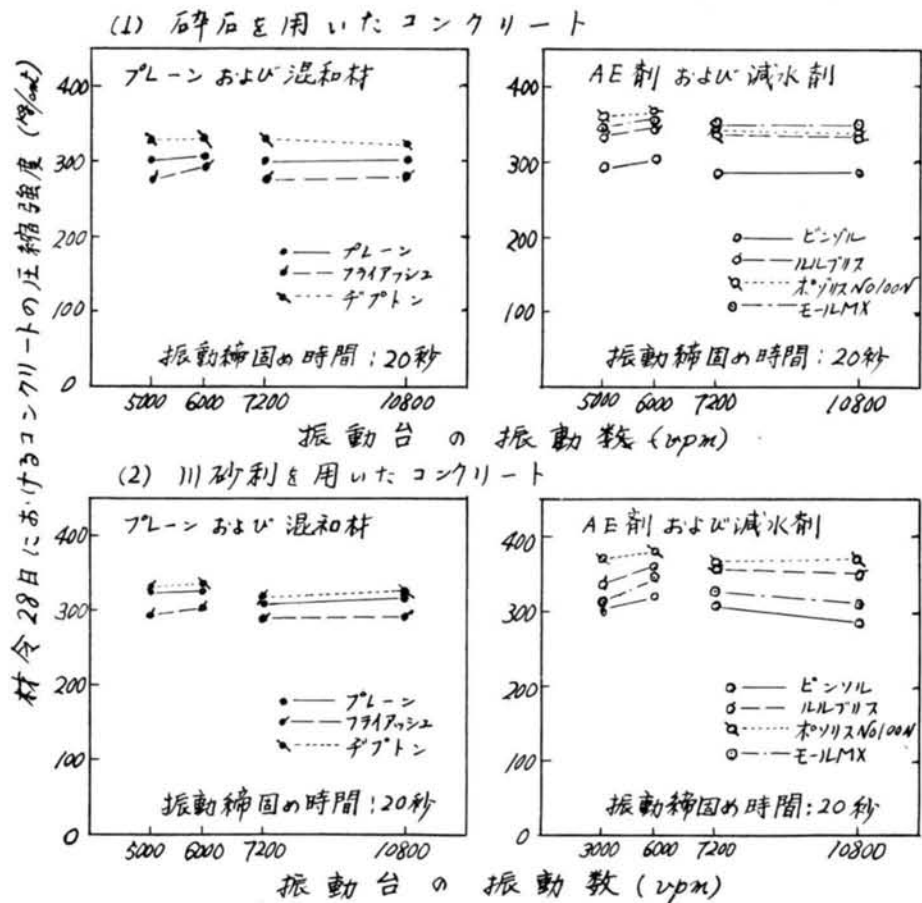
## (2) 実験結果の考察

各種コンクリートの材令 28 日の圧縮強度におよぼす振動数の影響を示した図－1.4.10 にみられるように低振動数用の振動台で締固めた場合には、砕石および川砂利コンクリートとも 5000 vpm から 6000 vpm へと振動数をあげると圧縮強度は高くなる傾向がある。ブレンコンクリートや混和材を用いたコンクリートに比べて A E 剤、減水剤を用いたものは、この傾向が顕著であり、これは前節で述べたようにコンクリートの流動性のよくなることや気ほう排除の影響と思われる。

一方、高振動数の振動台では、7200 vpm と 10800 vpm で締固めた結果に大差なく、A E 剤や減水剤を用いた川砂利コンクリートでは、ボゾリス No. 100 N を用いたものをのぞくとむしろ低下の傾向を示している。Davis<sup>6)</sup> は、振動加速度 20 g までは、加速度の増加とともに締固め効果は大となると報告しており、同一種の振動台では振動数が高くなると加速度が大となり締固め効果がよくなると考えられるが、本実験の結果、高振動数の振動台では締固め効果

に顕著な差がみられなかったのは、コンシステンシーの大きいコンクリートでは過振動となつて逆に材料分離の傾向を示すためではないかと考えられる。たとえば、A Eコンクリートを7200 vpm と10800 vpm で締め固めた場合の断面を比較すると、写真-1.4.6 に示すよう

図-1.4.10 振動台の振動数と各種コンクリートの圧縮強度

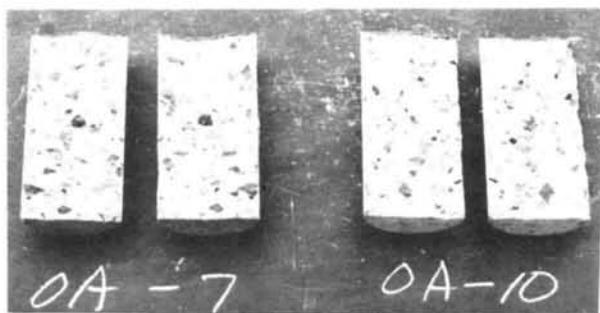


に、高振動数の10800 vpm では、粗骨材とモルタルとが分離し、粗骨材が下方にモルタル

写真-1.4.6

高振動数で締め固めたA Eコンクリートの断面の一例

7200 vpm      10800 vpm



は上方に多少集まる傾向が認められる。したがって、コンシステンシーの大きいあるいはA E 剤、減水剤などを用いたワーカビリティのよいコンクリートでは高振動数用の振動台でも、低目の振動数たとえば7200 vpm で十分に締固めができることを示している。なお、大石ら<sup>52)</sup>の研究結果でも、振動数7500 vpm と10000 vpm との締固め効果に差がみられないが、高振動数の場合の振動加速度、振幅などの影響についてはさらに検討する必要があると思われる。また、振動数7200 vpm と10800 vpm とで締固めた川砂利コンクリートの単位重量と動弾性係数をみるとA Eコンクリートでも、ほぼ同じ値か後者がやや大となっており、強度とは逆の傾向を示している。

つぎに、振動数別に各種コンクリートの平均強度を求めると、表-1.4.7のように大差ないが、6000 vpm の振動数の場合が、他の条件よりやや締固め効果がよくなっている。

表-1.4.7 コンクリートの強度におよぼす振動数の影響

振 動 数 ( vpm )	5 0 0 0	6 0 0 0	7 2 0 0	1 0 8 0 0
圧縮強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	3 2 3	3 3 6	3 2 2	3 1 8

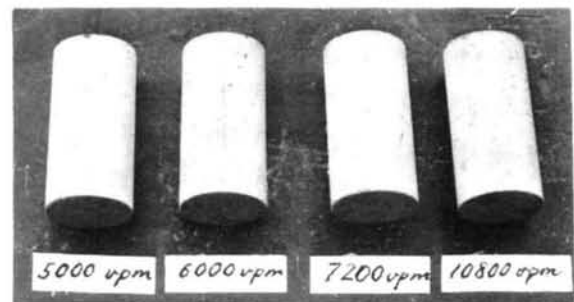
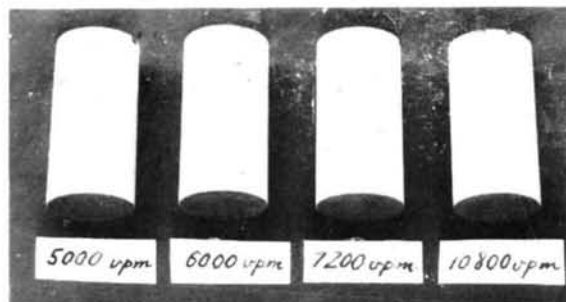
注) コンクリートの配合 1 4 種の平均値

なお、各種コンクリートについて、各振動数で締固めたコンクリートの脱型後のはだ面の観察も行なった。その一例を示すと写真-1.4.7のとおりであり、顕著な差は認められないが、Kolek<sup>34)</sup>の指摘しているように高振動数のほうが、はだ面はわずかによくなる傾向がある。とくに、空気を連行しない良質の減水剤を用いると各振動数の場合とも、強度のみならず、表面に気泡が少なく、比較的良好なはだ面がえられている。

写真-1.4.7 振動数をかえて締固めたコンクリートのはだ面の一例

(1) 碎石を用いたブレンコンクリート

(2) 川砂利を用いたA Eコンクリート



## § 5. かた練りコンクリートの配合と強度

### (1) 実験の概要

碎石の振動締固め製品への利用に関して基礎的資料をえるためにコンクリートの配合と強度特性との関係について川砂利コンクリートと比較して検討を行なった<sup>69)</sup>。

碎石は、本章第1節で述べた松山碎石(砂岩碎石と記す)、高知碎石(石灰岩碎石)、および吉野川産の川砂利で、いずれも最大寸法20mmとし、20~10mmおよび10~5mmの2粒度区分にふるい分け、標準粒度範囲に入るよう粒度調整して使用した。細骨材は粗粒率2.73の吉野川産の川砂を用いた。

普通ポルトランドセメントを用い、コンクリートの配合は表-1.4.8(1)、(2)に示すように、単

位セメント量を320Kgと420Kgとの一定とし目標スランブを5種にかえたものと、目標スランブを0.2cm、2cmおよび6cmとしそれぞれセメント水比を3種にかえたものを選定した。

表-1.4.8 使用したコンクリートの配合

(1) 単位セメント量を2種とし、目標スランブを5種にかえた場合

目標 スランブ (cm)	川 砂 利					砂 岩 砕 石					石 灰 岩 砕 石				
	W/C (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	W/C (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	W/C (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)
6	54.1	173	320	815	1,030	60.3	193	320	870	931	59.4	190	320	880	955
4	53.4	171	320	817	1,030	59.4	190	320	878	931	58.1	186	320	891	955
2	52.5	168	320	823	1,030	58.1	186	320	886	931	56.9	182	320	901	955
1	50.3	161	320	846	1,030	55.3	177	320	909	931	54.1	173	320	925	955
0.2	47.5	152	320	867	1,030	52.2	167	320	935	931	50.9	163	320	951	955
6	41.9	176	420	723	1,030	46.4	195	420	783	931	45.7	192	420	796	955
4	41.2	173	420	731	1,030	45.7	192	420	791	931	44.8	188	420	807	955
2	40.5	170	420	739	1,030	45.0	189	420	802	931	43.6	183	420	820	955
1	38.1	160	420	762	1,030	42.4	178	420	828	931	41.4	174	420	844	955
0.2	35.7	150	420	789	1,030	40.2	169	420	854	931	39.0	164	420	870	955

(2) 目標スランブを3種とし、水セメント比を3種にかえた場合

目標 スランブ (cm)	W/C (%)	川 砂 利				砂 岩 砕 石				石 灰 岩 砕 石			
		W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)
6	53	174	328	804	1,030	192	362	833	931	189	357	849	955
	43	174	405	739	1,030	192	447	762	931	189	440	778	955
	36	175	486	673	1,030	195	542	684	931	192	533	702	955
2	53	170	321	820	1,030	185	349	862	931	180	340	886	955
	43	170	395	760	1,030	185	430	794	931	180	419	820	955
	36	175	486	676	1,030	188	522	710	931	184	511	736	955
0.2	53	151	285	901	1,030	166	313	943	931	161	304	964	955
	43	151	351	846	1,030	166	386	880	931	161	374	907	955
	36	155	431	768	1,030	170	472	799	931	165	458	828	955

注) 粗骨材の最大寸法は20mm、コンクリートの練り上り温度30℃の配合

強制練りミキサで練りまぜを行なったのち、まだ固まらないコンクリートについてはスランブ試験、VB試験、CF試験などを行なったが、この結果については第8章で述べる。

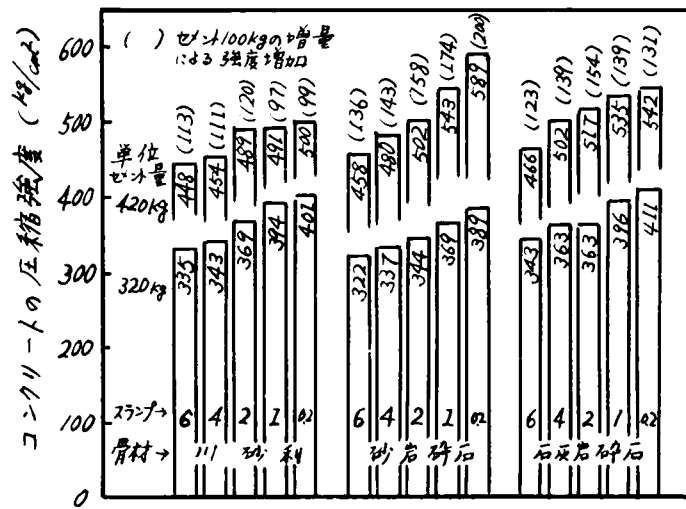
所定の型わくにコンクリートを詰め、低振動数の振動台を用い、振動数5000vpm、加速度11~12gの条件で、目標スランブ0.2、1、2、4および6cmに対しそれぞれ30、25、20、15および10秒間締固めを行なった。材令28日まで、20℃±2degで水中養生し、圧縮強度(φ10×20cm円柱形)、曲げ強度(ロ10×10×40cmはり)および引張強度(φ10×20cmまたはφ15×30cm円柱形)を測定し、配合との関係を検討した。なお、圧縮強度試験の前には動弾性係数を求めた。

(2) 実験結果とその考察

1) 単位セメント量と圧縮強度、引張強度および曲げ強度

使用骨材と目標スランブ別に単位セメント量と圧縮強度との関係を示した図-1.4.11に

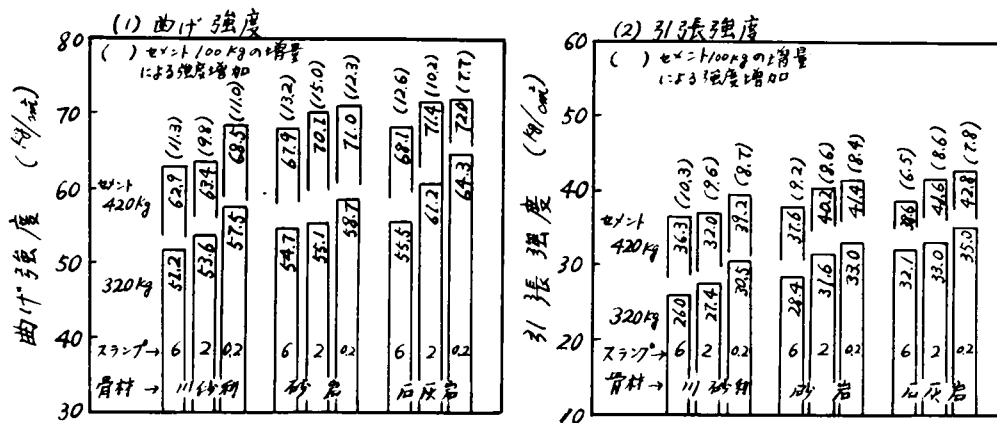
図-1.4.1 単位セメント量とスランブをかえたコンクリートの圧縮強度



みられるように、セメント100Kgの増量による圧縮強度の増加は、骨材の種類によつていくぶんことなり、川砂利コンクリートで平均108%、砂岩碎石で152%であり、碎石コンクリートのほうがセメントの増量による強度の伸びはよく、これはセメント協会の報告と一致している。このように碎石ではセメント効率がよくなるのは、碎石面が粗でセメントペーストとの接着がよくなること、振動締固めによつて骨材粒子のかみ合せが進み安定した構造をつくることなどのためと考えられる。

つぎに、単位セメント量のことになった場合の曲げ強度と引張強度は、図-1.4.12 のようになり、セメント100Kgの増量による曲げ強度の増加は、川砂利、砂岩および石灰岩のコンクリートで、それぞれ10.7、13.5 および10.2%であり、引張強度では、9.5、8.7お

図-1.4.12 単位セメント量のことなるコンクリートの曲げ強度と引張強度





よび  $7.6 \text{ Kg/cm}^2$  であり、圧縮強度よりかなり小さい。

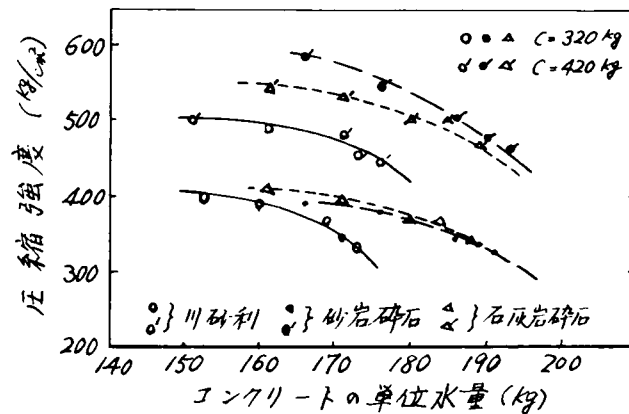
なお、高強度をえるためにはかた練りの富配合が望ましいが、ドラムミキサでは練りませ性能が劣り、また収縮の増大、温度ひびわれなどを避けるため、良質の減水剤の使用によるセメントの節約も考慮する必要があるだろう。三浦ら<sup>73)</sup>は、富配合にはセメント分散剤の使用が有効であると述べている。

## 2) 単位水量と圧縮強度について

単位水量の少ないコンクリートは水セメント比が小となり、強度が高くなりしかも耐久性、水密性などが向上し、容積変化も小となるので、施工にさしつかえない範囲で水量を少なくするのが望ましい。とくに骨材の管理状態がわるいと単位水量が変わり、スランプが変動し強度に影響を与えることになる。

振動台で締固めた3種コンクリートの単位水量と圧縮強度との関係は図-1.4.13のように

図-1.4.13 かた練りコンクリートの単位水量と圧縮強度



なり、スランプ2~6cmのコンクリートでは、単位水量が5kg増加した場合、碎石では20~30  $\text{Kg/cm}^2$ 、川砂利では25~35  $\text{Kg/cm}^2$  圧縮強度が減少する。この場合、スランプの変動は1~3cmである。なお、スランプが2cm以下のごくかた練りになると単位水量の強度への影響は小となる。

なお、棒形振動機で締固め、安倍川産の川砂利を用いたコンクリートの試験結果<sup>74)</sup>では、表-1.4.9に示したように単位水量6kgの増加に対し、スランプは約2cm大となり、セメン

ト量が同一だと強度は  $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$  減少しており、本実験結果よりやや小さい値を示している。

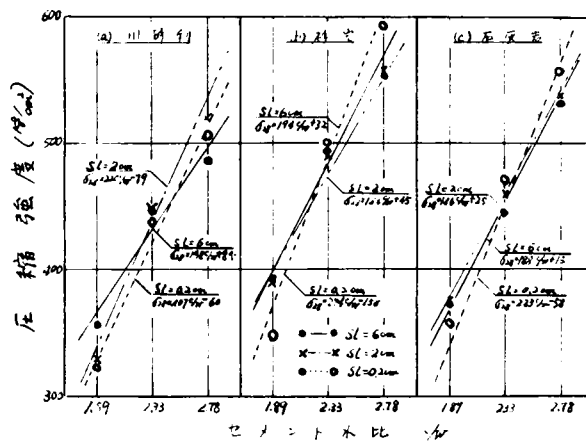
表一 1. 4. 9 コンクリートの単位水量と圧縮強度

セメントの種類	コンクリートの示方配合								圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )		
	Ms. (mm)	Slump (cm)	C (kg)	W (kg)	w/c (%)	s/a (%)	S (kg)	G (kg)	3日	7日	28日
普通	25	2.0	400	153	38.3	42	775	1084	270	403	543
	"	4.5	"	159	39.7	"	770	1073	249	378	526
	"	6.5	"	166	40.2	"	762	1063	228	348	506
	"	8.5	"	172	43.0	"	755	1055	202	329	494
	"	10.0	"	176	44.0	"	749	1044	192	320	486
早強	25	2.3	400	155	38.8	41	755	1097	474	590	664
	"	4.0	"	163	40.8	"	747	1084	421	541	629
	"	6.0	"	170	42.5	"	739	1073	414	507	601
	"	8.0	"	175	43.8	"	734	1065	362	597	578
	"	10.5	"	180	45.0	"	728	1057	348	472	574

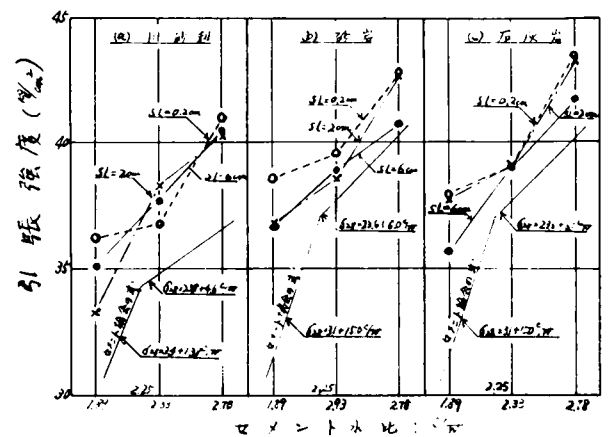
### 3) セメント水比と圧縮強度、引張強度との関係

3種スランプのコンクリートについてセメント水比と圧縮強度および引張強度との関係を示すと図一 1. 4. 1 4 および図一 1. 4. 1 5 のとおりで、セメント水比と圧縮強度との関係は直線で示されるが、引張強度は測定値の変動が大となっている。セメント協会の報告<sup>72)</sup>では、セメント水比 2.25 の値を境界として2つの式を示している(図一 1. 4. 1 5 参照)。

図一 1. 4. 1 4 セメント水比と圧縮強度



図一 1. 4. 1 5 セメント水比と引張強度



セメント水比が同じ場合、コンシステンシーによる強度差は小さいので、骨材別に圧縮強度を平均し両者の関係式を求めると表一 1. 4. 1 0 のとおりである。なお、かた練りで水セメント比の範囲が 36~53% と比較的狭いので、横道ら<sup>75)76)</sup>の報告しているように実用的には水セメント比と強度との関係も 1 次式で示すことができる(表一 1. 4. 1 0 参照)。これらの結果にみられるように、同一セメント水比あるいは水セメント比では岩種によってこととなるが、明らかに砕石コンクリートの強度が川砂利を用いたものより大となっている。

表－1.4.10 セメント水比および水セメント比と圧縮強度との関係

使用骨材	$\sigma_{28} \sim c/w$	$\sigma_{28} \sim w/c$
砂岩碎石	$\sigma_{28} = 199c/w + 20$	$\sigma_{28} = 952 - 10.6w/c$
石灰岩碎石	$\sigma_{28} = 197c/w + 6$	$\sigma_{28} = 918 - 10.3w/c$
川砂利	$\sigma_{28} = 171c/w + 34$	$\sigma_{28} = 823 - 9.1w/c$

#### 4) 碎石コンクリートと川砂利コンクリートとの強度比較

同一セメント量における碎石コンクリートと川砂利コンクリートとの強度を比較すると表－1.4.11のとおりである。320Kgの配合では、砂岩碎石の圧縮強度は川砂利コンクリートよりわずかに低いが、石灰岩碎石では同じ値となっている。富配合では碎石コンクリートが明らかに有利である。また、曲げ強度、引張強度については320Kg、420Kgの両配合とも碎石を用いたものが川砂利コンクリートより平均10%大であり、横道ら<sup>77)</sup>の研究結果とはほぼ一致した傾向

表－1.4.11 碎石コンクリートと川砂利コンクリートとの強度比較

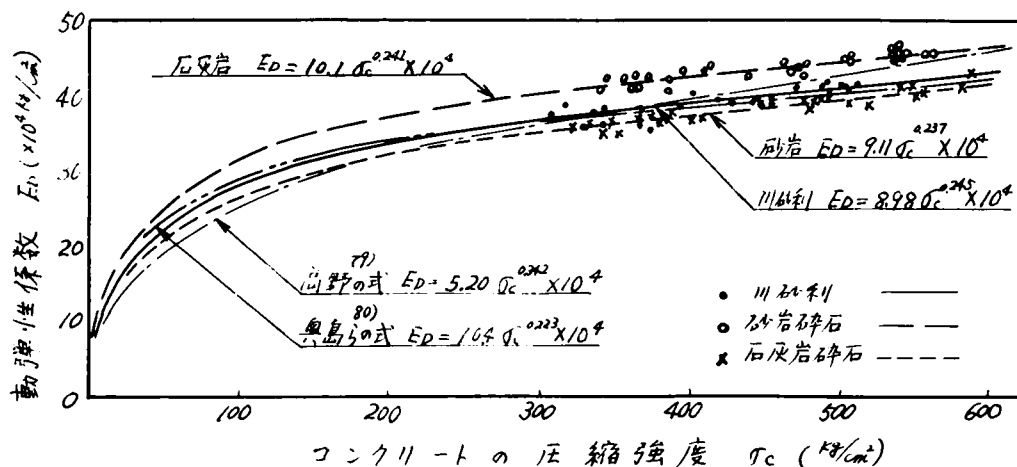
強度特性	単位セメント量 (Kg)	砂岩 川砂利 強度比	石灰岩 川砂利 強度比
圧縮強度	320	0.96	1.00
	420	1.08	1.08
曲げ強度	320	1.04	1.11
	420	1.08	1.09
引張強度	320	1.11	1.19
	420	1.06	1.09

注) スランブのことなるかた練りコンクリートの平均値

向がえられている。なお、同一水セメント比で、スランブが一定であれば、前述したように、圧縮強度、引張強度とも碎石コンクリートのほうが大となっている。

#### 5) 圧縮強度と動弾性係数との関係

図－1.4.16 コンクリートの圧縮強度と動弾性係数との関係



コンクリートの材令28日の圧縮強度と動弾性係数の関係を示すと図-1.4.16のとおりである。この関係は、セメントの品質、骨材の種類、配合などによって影響を受けると述べられているが、<sup>78)</sup>この結果でも、骨材の種類によって多少ことになっている。同一圧縮強度に対するコンクリートの動弾性係数は、砂岩、川砂利、石灰岩の順に大きくなっている。これは、石灰岩の比重が他の骨材よりやや大きいためと思われる。砂岩および川砂利コンクリートの結果は奥島らの実験式<sup>80)</sup>と比較的よく一致している。

製品工場における工程管理に動弾性係数を使用する場合には、実際に使用する材料と配合を用いて、とくに初期材令の強度も考慮して両者の関係式を求めておけば、管理用供試体の動弾性係数を求めて、養生期間、出荷時期などの推定が可能になると思われる。

## § 6. 結 語

碎石を用いたかた練りコンクリートの振動台による最適締固め条件について、主として低振動数の振動台を用いて、川砂利コンクリートの結果と比較して検討し、さらに混和材料の影響、高振動数締固めの効果、かた練り碎石コンクリートの配合と強度などについて調べた本章の結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 碎石コンクリートの最適締固め条件は、川砂利コンクリートの場合と大差なく、振動数5000～6000 vpm、振幅約1.0 mmの条件が適当であり、碎石コンクリートは川砂利を用いたものに比べて振動締固め時間を長くした場合の強度の増進率が高いので、川砂利コンクリートより多少長くして45～60秒とするのがよい。
- (2) 良質のA E剤や減水剤を用いるとコンクリートの締固め効果がよくなり、とくに振動数、振動加速度を大きくすると強度増加が顕著であり、これは気ほう排除の影響と思われる。A Eコンクリートは流動性がますので、ブレンコンクリートに比べて振動締固め時間を短縮することができる。
- (3) コンクリートの動弾性係数によっても締固め効果の判定が可能であるが、圧縮強度に比べると締固め条件や配合による差が小さい。また、コンクリートの単位重量が増加するとその強度も高くなる傾向があり、実際の工場において締固めの良否の判定の一つの資料にできると考えられる。
- (4) スランプ5 cmの比較的コンシステンシーの大きいコンクリートを用いて高振動数による締固めを行なった場合、10800 vpm と7200 vpm による締固め効果の差は認められていないが、これは、ワーカブルなコンクリートでは低目の振動数で十分締固めが可能になり、振動数が高すぎると過振動となって逆に材料分離の傾向がみられるためと思われる。なお、コンクリートのはだ面は振動数が高いほどいくぶんよくなる傾向がある。
- (5) 振動台で締め固めた碎石コンクリートの強度は、水セメント比とスランプ一定の場合、川砂利コンクリートより明らかに大きい。セメント量とスランプ一定の場合には、単位セメント量320 Kgの配合では圧縮強度は大差ないが、富配合になると圧縮強度、曲げ強度、引張強度ともに碎石コンクリートのほうが川砂利を用いたものより高くなる。

## 第 5 章 人工軽量骨材コンクリートの振動締固め

### § 1. 緒 言

近年、軽くて強い良質の人工軽量骨材が開発されて以来、川砂利の不足とあいまって、人工軽量骨材コンクリートが一般の土木、建築工事に盛んに使用されるようになり、その基礎的性質や使用方法について多くの研究が行なわれている。<sup>81)~90)</sup>

コンクリート製品は軽量化されると運搬、取扱いなどの点できわめて有利であり、また上部構造に用いると下部構造の簡易化、スパンの長大化などの利点があり、人工軽量骨材の土木用製品への利用が注目されているが、これを対象としたかた練りコンクリートに関する研究結果はきわめて少ない。普通ポルトランドセメントを使用し、非造粒型の人工軽量骨材を用いた製品用配合のコンクリートを川砂利コンクリートと比較した結果、表-1.5.1に示すように、土木用製品に用いるのに十分な強度がえられている。

表-1.5.1 製品用の人工軽量骨材コンクリートの配合と圧縮強度の一例<sup>91)</sup>

配合 No.	使用骨材の種類	コンクリートの配合							標準養生の 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
		最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位 セメント量 (Kg)	単位 水量 (Kg)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	7日	28日
I	人工軽量粗、細骨材	20	3~5	-	450	170	37.8	44	390	506
	川砂利、川砂	20	3~5	-	450	165	36.6	43	427	612
II	人工軽量粗、細骨材	20	10~12	-	350	185	52.8	50	253	422
	川砂利、川砂	20	10~12	-	350	171	48.9	45	308	478
III	人工軽量粗、細骨材	20	10~12	5~5.5	350	170	48.6	43	245	383
	川砂利、川砂	20	10~12	5~5.5	350	160	45.7	39	267	392

\* 安倍川砂利、荒川砂使用

人工軽量骨材には、頁岩あるいは粘土を破碎したのちふるい分けてキルンで焼成した非造粒型のものと、これらの原石を粉碎し造粒してキルンで焼成した造粒型のものとがあり、前者は粒形が天然の川砂利に近いが、後者は丸味を持ち球に近く、河川産骨材に比べると両者とも比重がかなり小さく、最大寸法、吸水量などもことなるので、練りませ、運搬、打込み、締固め、仕上げなどの施工の際には十分な配慮が必要である。<sup>92)</sup> この中でも、締固めはコンクリートの硬化後の品質と関係するきわめて重要な問題であり、川砂利とは粒形や比重がちがうので締固め条件もことなってくると考えられる。

人工軽骨材コンクリートの振動締固めについての従来よりの研究結果はきわめて少なく、神山<sup>32)</sup>の振動伝播性に関する研究、高橋<sup>93)</sup>、菅原<sup>94)</sup>のPCはりの施工の際の型わく振動機による締固めの研究、杉木<sup>95)</sup>、堺<sup>96)</sup>の遠心力締固めの研究、鳥田<sup>97)</sup>の建築用コンクリートの施工上の問題点に関する研究などがあるにすぎず、とくに振動台による振動締固めについては報告がなく、今後研究を進めなければならない。さらに、人工軽量骨材を用いたかた練りコンクリートの強度特性、弾性係数、乾燥収縮などの基礎的性状についても明らかにしておく必要がある。

したがって、本章では、粒形のことなる2種の代表的な人工軽量骨材を用いたスランブ0.5~6cmの製品を対象としたかた練りコンクリートを振動台で締固め成形し、その締固め効果におよぼす振

動数、振幅、加速度および振動時間の影響を調べ、最適締固め条件について考察し、さらに振動台で締固めたかた練りコンクリートの強度特性、弾性係数、乾燥収縮などの基礎的性質について検討を行なった。

## § 2. 振動締固め条件の影響

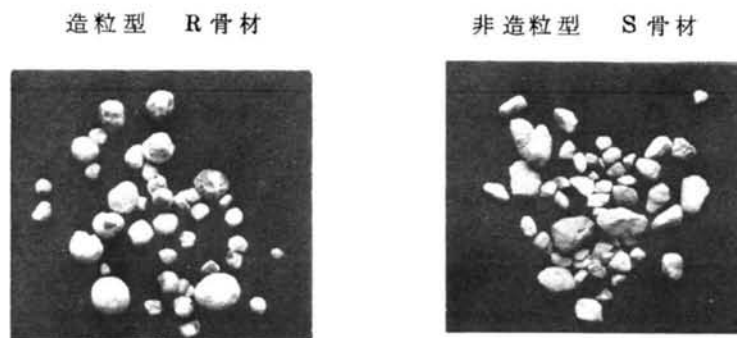
### (1) 実験の概要

#### 1) 使用材料とコンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメント（比重＝3.15、28日圧縮強さ＝412Kg/cm<sup>2</sup>）を用いた。

人工軽量骨材は形状の異なる市販の代表的なもの2種を使用した。すなわち、A社製の造粒型膨張頁岩（以下R骨材という）とB社製の非造粒型膨張頁岩（以下S骨材という）で、粗骨材の一例を写真－1.5.1に、物理試験結果を表－1.5.2に示す。

写真－1.5.1 実験に用いた人工軽量粗骨材の一例



コンクリートの配合は一般の振動締固め製品を対象とし、単位セメント量330Kgで目標ス

表－1.5.2 人工軽量骨材の試験成績

人工軽量骨材の種類		絶乾比重	表乾比重	単位容積重量 (Kg/m <sup>3</sup> )	吸水量(%)	粗粒率	浮粒率(%)
造粒型	細骨材	1.84	1.92	1179	4.28	2.65	—
	R骨材	1.34	1.37	873	2.02	6.44	2.3
非造粒型	細骨材	1.60	1.90	1013	18.7	2.86	—
	S骨材	1.13	1.24	718	9.63	6.59	14.7

表－1.5.3 使用したコンクリートの配合

配合の種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量				
					水 W (Kg)	セメント C (Kg)	細骨材 $\mu$ (m <sup>3</sup> )	粗 骨 材 $\rho$ (m <sup>3</sup> )	
								5～10mm	10mm以上
R-I	15	1±0.5	49.7	48	164	330	0.336	0.201	0.164
II	15	3±1	52.4	46	173	330	0.318	0.206	0.168
III	15	6±1	54.6	44	180	330	0.301	0.211	0.173
S-I	20	1±0.5	46.1	48	152	330	0.342	0.148	0.223
II	20	3±1	48.8	46	161	330	0.324	0.152	0.228
III	20	6±1	50.9	44	168	330	0.307	0.156	0.234

注) コンクリートの成形温度、27～29℃

ランブを3種にかえた表-1.5.3 に示す配合を用いた。

## 2) 試験方法

粗骨材は使用の1週間前に散水し、十分にブレウエッチングを行なったのち表面乾燥飽水状態にして用い、細骨材は表面乾燥飽水状態に近いものを多量につくりビニール袋に密封しておき、使用時に表面水を補正した。軽量のかた練りコンクリートなので、練りませの際には強制練りミキサを用い、最初の1分間でモルタルを練り、ミキサを止め粗骨材を投入したのちさらに1分間練りませを行なった。

コンクリートの締固めには丸東製作所製の2000～6000 vpm の振動数のとれる不平衡重錘式振動台(P.15参照)を用いた。鑄鉄製の $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱形型わくにコンクリートを1層に盛り込み、この型わく2個を振動台のテーブル中央部に固定し、表-1.5.4の条件で締め固め、振動数、振幅などの影響を調べた。

手動で加速と減速を行なうのに3000 vpm の場合で約6秒、6000 vpm では約12秒を要するので、実際の締固め時間は多少長くなるが、振動時間は所定振動数での締固め時間とし、型わく上面のコンクリートの沈下や骨材の浮上の程度をみて、スランブによって変え、比較的短い表-1.5.4の値とした。なお、振動時間の影響を調べる場合には、配合Ⅰと配合Ⅲのコンクリートを用い、振動数を3000、4000 および5000 vpm の3種にとり、配合Ⅰでは10、20および30秒 配合Ⅲでは5、10 および15秒 の3種類とした。

なお、振動台の結果と比較するため、直径28mm、振動数8000 vpm の棒形振動機で締固めた供試体も作成した。この場合に、振動締固め時間は配合Ⅰで10秒、配合Ⅱで8秒、配合Ⅲで5秒とし、締固めの時間の影響を検討する場合には、5、10 および15秒 とし、成形後型わく側面を軽く木づちでたたいた。

締固め終了後、表面に浮上した軽量骨材をこてで軽く押えて面を平らにしたのち20～21℃の恒温室に移し、数時間後に表面仕上を行った。翌日脱型し、材令7日および28日 まで20～22℃の水そうで水中養生を行なった。

所定材令になった供試体は、水切り後、重量をはかってからヤング率測定器で共振周波数をはかり動弾性係数を求めたのち、圧縮強度試験を行ない、主としてこの値によって締固め効果の判定を行なった。

供試体数は1種につき3個としたが、その変動係数は大多数の値が6%以内であり、平均が3.3%であった。

表-1.5.4 振動台によるコンクリートの締固め条件

振動数(vpm)	振幅(mm)	振動時間*(sec)	使用コンクリート
3000	1.2 0.8	10、15、20	R-I, II, III, S-I, II, III
4000	1.1 0.7	10、15、20	R-I, II, III, S-I, II, III
5000	1.0 0.6	10、15、20	R-I, II, III, S-I, II, III
6000	1.0 0.6	10、15、20	R-I, II, III, S-I, II, III

\* 所定振動数での締固め時間 R-I、S-I：10秒、R-II、S-II：15秒 R-III、S-III：30秒

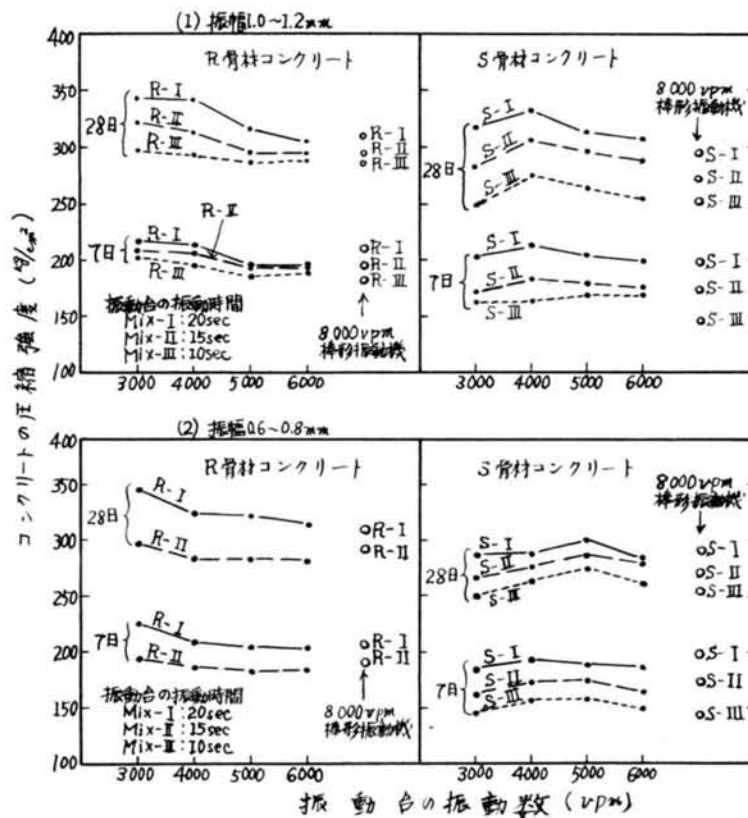
## (2) 実験結果とその考察

### 1) 振動数および振幅の影響

振動台の振動数と材令7日および28日の圧縮強度との関係を振幅の大きい場合(1.0～1.2 mm)と小さい場合(0.6～0.8 mm)とにわけて示すと図-1.5.1のとおりである。川砂利や碎石コンクリートでは、第3章、第4章に述べたように低振動数用振動台では6000 vpm がもっとも締固め効果がよかったが、人工軽量骨材コンクリートでは本実験の結果にみられるように

低い振動数でよい結果がえられている。同じ種類の配合では、各振動数での振動時間を同一としているが、加速減速期間を入れると振動数が高いほど振動時間が多少長くなるにもかかわらず

図-1.5.1 振動台の振動数と人工軽量骨材コンクリートの圧縮強度



ず、5000 vpm ~ 6000 vpm では強度増加はみられず、むしろ低下の傾向を示している。この傾向は、スランブの小さい配合の場合、振幅の大きい場合、粒形が丸味をもったR骨材を用いた場合に顕著である。振動数をあげても軽量コンクリートの締め固め効果が上らないのは、骨材が川砂利に比べて軽いため、振動数が増し加速度が大となると、写真-1.5.2 にみられるように粗骨材が浮上し材料が分離する傾向がでてくるためと思われる。

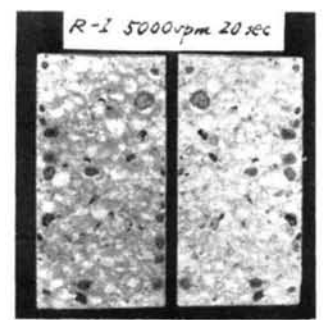
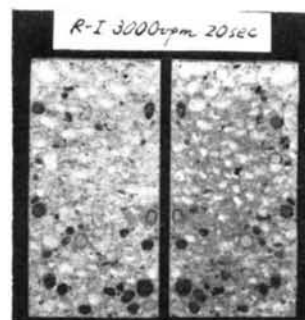
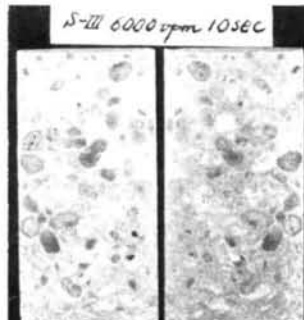
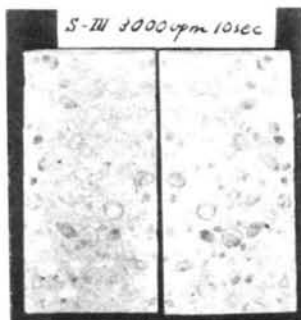
写真-1.5.2 振動数をかえて締め固めた供試体切断面の一例

S-II 3000 vpm

S-II 6000 vpm (10sec)

R-I 3000 vpm

R-I 5000 vpm (20sec)





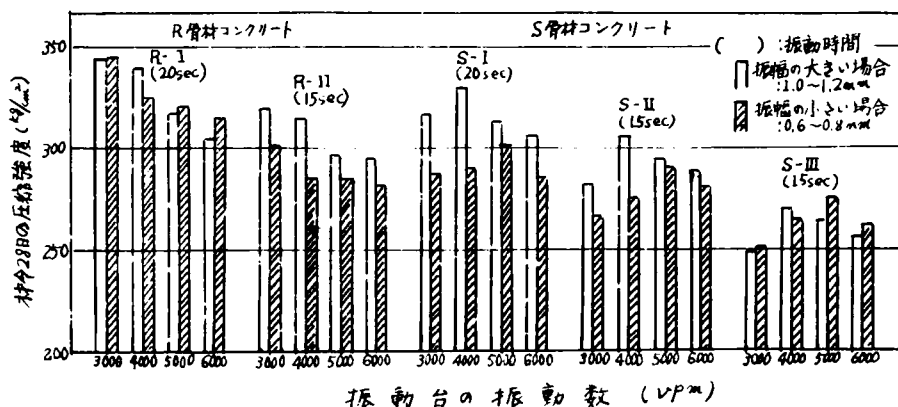
造粒型と非造粒型の骨材では明らかにことなつた傾向がみられ、最適振動数は相違しているが、造粒型の骨材は球形であるので締固めの際の粒子間の摩擦が小さくコンクリートの流動性がよくなるために低い振動数で締固めできるものと考えられる。なお、Powers<sup>10)</sup>はセメントペーストの水セメント比が大きいと、粘性が小さくなり粒子間のせん断抵抗が低下し流動性がよくなると述べており、粒形のほか造粒型では単位水量の12kg程度多くなっていることも原因の一つと考えられる。

つぎに、振幅の強度におよぼす影響については図-1.5.2のように3000~4000vpmの低振動数では、1、2の例外はあるが振幅の大きいほうが強度は高い。しかし、5000~6000vpmの高振動数になると振幅の大、小による強度差は小となる傾向がみられ、R-IおよびS-IIIの配合では逆に振幅の小さいほうがよい結果がえられる。これは、振動数が高いと振幅を小さくしたほうが骨材の浮上による分離が少なくなるためと思われる。一般に高振動数の振動台では低振幅を採用しているが軽量コンクリートではこの点をとくに注意する必要がある。

なお、軽量コンクリートでも図-1.5.1に示したようにコンシステンシーが大きくなると締固め条件による強度差が小となり、振動数や振幅の相違の影響が小さくなる傾向がある。また、棒形振動機で締め固めた場合の強度と振動台の値とを比較すると、最適振動数の結果でみると明らかに振動台での締固め効果がよく、とくにかた練りの場合に顕著である。

結局、軽量コンクリートを振動台で締め固める場合、普通コンクリートより低い振動数での締固めが可能であり、骨材の種類によってことなるが4000vpm前後が適当と思われる。

図-1.5.2 各種振動数で締め固めたコンクリートの振幅の大小による圧縮強度の比較



## 2) 振動加速度の影響

振動台の型わく取付け位置における振動加速度の実測値と圧縮強度との関係を示すと図-1.5.3のとおりである。加速度を大きくしても締固め効果はよくなるとはかぎらず、造粒型のR骨材のコンクリートで5~10g、非造粒型のS骨材では10g前後で締め固めると比較的よい結果がえられている。

かた練りの普通コンクリートでは加速度の増加とともに圧縮強度は高くなる傾向がみられ、Davis<sup>6)</sup>の研究でも20gまでは加速度とともに強度は増加しているが、軽量コンクリートでは、加速度が大きくなると粗骨材が上方に集まり分離する傾向が顕著になるためにより締固め効果がえられないものと思われる。

## 3) 振動時間の影響と締固め過程

造粒型のR骨材を用いたコンクリートについて振動締固め時間と圧縮強度との関係を示した図-1.5.4にみられるように、締固め時間を長くしても川砂利を用いた普通コンクリートのよう

図-1.5.3 振動台の加速度と圧縮強度との関係

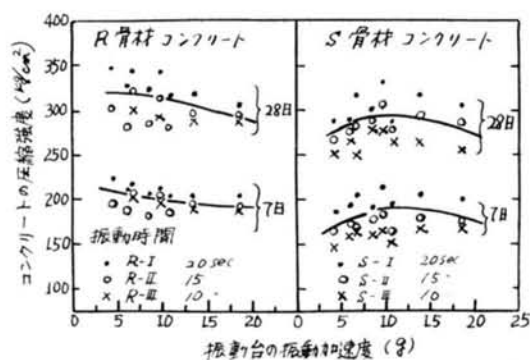
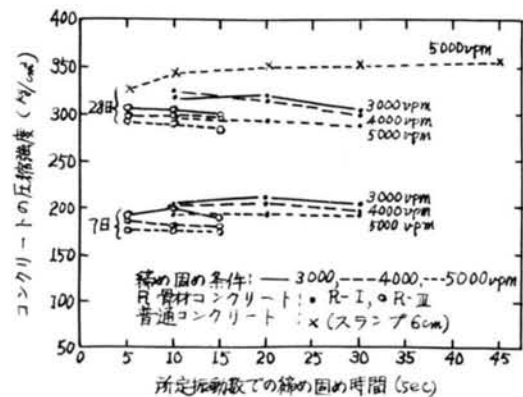


図-1.5.4 振動台の振動締め時間と圧縮強度



川砂利コンクリートより短い振動時間で締め固めが可能であることを示している。

振動台による川砂利コンクリートの締め固め過程については第3章第4節で考察し、①コンクリート構成粒子の移動と沈下、②粒子の再配列と空けきの排除、③粒子のかみ合せの強化と組織の安定化、④材料の分離の4つの段階にわけて説明できると述べたが、軽量コンクリートでは骨材粒子が軽くしかも造粒型では球形であるため①～②の段階がきわめて短い時間で行なわれるものと思われる。すなわち、軽いために沈下が顕著でなく、骨材粒子は丸味をもっているため移動や再配列が早くすみ、気ほうや空けきの排除が十分に行なわれないうちに、粗骨材の浮上とペーストあるいはモルタルの沈下による材料の分離を生ずるためと考えられる。振動台で10、20および30秒と締め固め時間を長くして成形し、その断面を観察すると写真-1.5.3のように上層に粗骨材が多くなる傾向がみられている。また、本実験に用いた振動台は、テーブ

写真-1.5.3

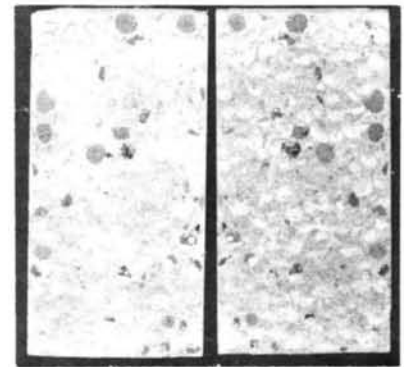
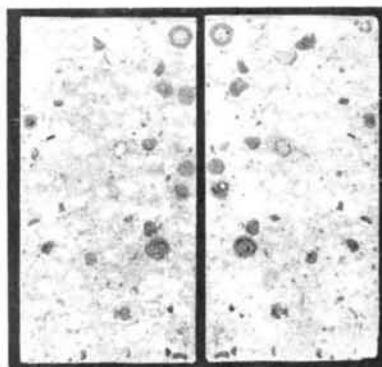
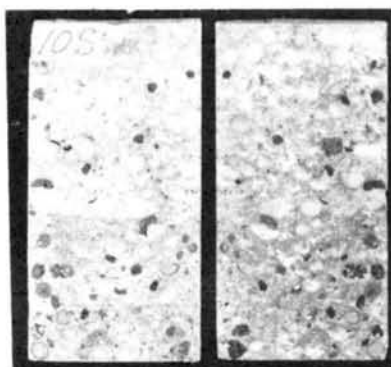
振動時間をかえて締め固めた供試体切断面の一例

コンクリートの配合：R-1、振動数：4000 vpm

(1) 振動時間 10 秒

(2) 20 秒

(3) 30 秒



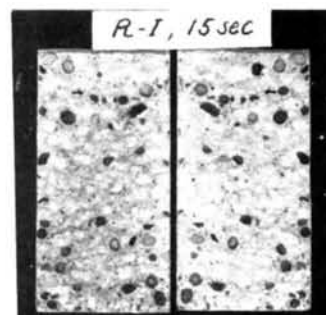
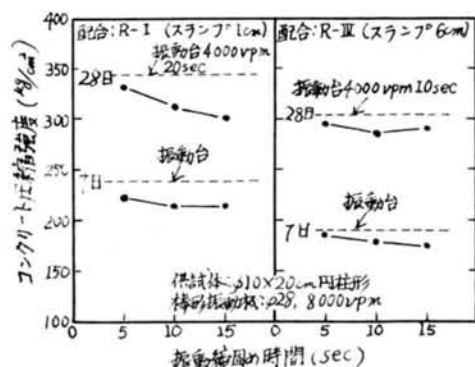
ルの下に取り付けた偏心錘2個が同じ方向に回転しているため、鉛直回転振動型のものであり、振動締め固め時間が長くなるとつきに述べる不規則な回転を生じて一度締め固められた組織が乱される場合もあり、この影響も考えられる。したがって、適当な振動締め固め時間は型わく上面の

コンクリートの状態も観察して判断する必要がある。

なお、棒形振動機で求めた振動締め固め時間と圧縮強度との関係は、図－1.5.5 のように振動台の場合よりさらに短い時間でよい締め固め効果がえられているが、これは供試体寸法の割合に振動棒の径が大きいことも影響していると思われる。15秒間締め固めたコンクリートの断面を観察するとモルタルが中央に集まり、粗骨材が周囲に押されている状況がみられた。(写真－1.5.4 参照)。

図－1.5.5 棒形振動機の振動締め固め時間と圧縮強度

写真－1.5.4 棒形振動機で締め固めたコンクリート断面の一例



棒形振動機を用いて締め固めを行なう場合、振動エネルギーが周囲のコンクリートに吸収され、振動伝播性が悪くなり締め固め効果が低下するので、Jones<sup>102)</sup>は7200 vpm 以上の高振動数の振動機で締め固めるのがよいと報告しており、今井ら<sup>105)</sup>はスラブの締め固めの際に10000 vpm 以上の内部振動機の使用が効果的であったと述べている。また、神山ら<sup>32)</sup>も軽量コンクリートでは川砂利コンクリートより振動の有効範囲が狭くなると報告している。したがって、棒形振動機を用いて軽量コンクリートを締め固める場合には、普通コンクリートに比べて、締め固め時間を短くするかわりに振動棒のさし込み間隔を密にしなければならない。

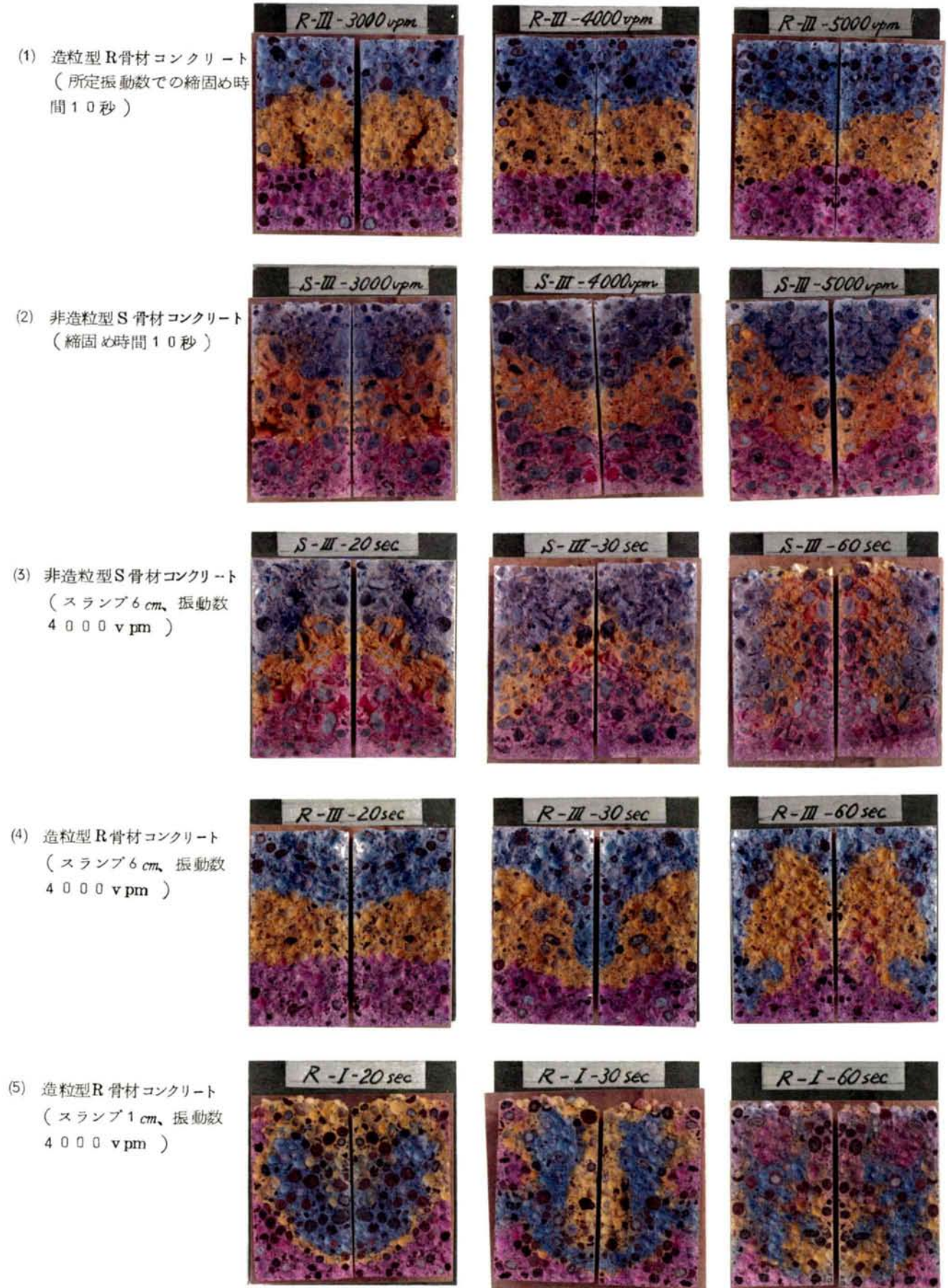
#### 4) 振動締め固め中のコンクリートの回転について

鉛直回転振動を与える振動台は、純粹に上下振動を行なう鉛直線形振動のものに比べて締め固め効果がよくなることが報告されているが、コンクリートのコンシステンシーや振動締め固め時間によっては型わく中のコンクリートが回転現象を呈することがある。

したがって、白色ポルトランドセメントを使用し、硬化を妨げない青色(Dスカイブルー6B)、黄色(クリソフェニン)、赤色(Dスカーレット4BS)の3種の市販染料を用いて着色コンクリートをつくり、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  および  $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$  の円柱形型わくに上、中、下の各層にそれぞれ詰め、振動数(3000、4000および5000 vpm)、振動時間(10、20、30および60秒)をかえて締め固め成形し、材令7日で供試体を割裂し、内部コンクリートの移動状態を調べた。これらの観察結果の一例を写真－1.5.5 (1)～(5)に示す。



写真-1.5.5 振動数や振動時間を変えて締め固めた  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$   
円柱供試体の切断面の状態



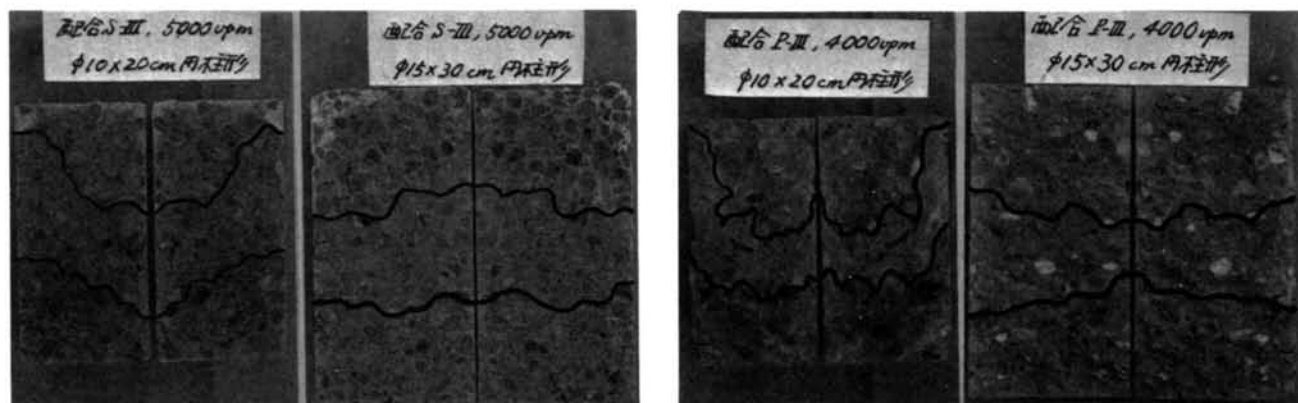
まず、配合Ⅲのコンクリートを振動機3000、4000および5000 vpm で10秒間締め固めた場合には、写真-1.5.5 (1)、(2)にみられるように造粒型のR骨材とも材料の分離や回転移動はみられない。しかし、形状の角ばったS骨材ではやや移動しようとする動きがある。つぎに、振動数は4000 vpm とし振動時間を20、30、60秒と長くして断面を観察すると写真-1.5.5 (3)(4)(5)のように、ワーカブルなコンクリートでも振動締め固め時間が長くなると不規則な回転を生ずる傾向が認められる。この場合、型わく側面に沿って下層のコンクリートが上層へ移動し、上層のコンクリートが下層に向うが、さらに回転が進むと全体が混合される。この際、重いモルタルが沈下し、軽い粗骨材が浮上する傾向にある。造粒形のR骨材を用いたものは、骨材粒子が球に近く、摩擦力が小さくなるので粒子がその位置で振動し回転するので、非造粒形のS骨材に比べてコンクリートの回転は顕著でない。しかし、R骨材でもスランプの小さい配合Ⅰになると振動時間20秒ですでに回転を生じている(写真-1.5.5 (5) 参照)。すなわち、ごくかた練りのコンクリートではワーカブルなコンクリートに比べて、馬場の<sup>26)</sup>指摘しているように振動伝播性が劣り、粒子間に存在するセメントペーストやモルタルの粘性やせん断抵抗も高くなるので回転移動を生じやすくなるものと思われる。

不規則な回転を生じると気ほう排除が十分に進まず、逆に空気の巻き込まれるおそれがあり、一度締め固められ安定した組織を乱すことになるので、強度の伸びない一つの原因になると考えられる。なお、 $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ の円柱供試体を用いた場合については、人工軽量骨材コンクリートのほかスランプ6cmの川砂利コンクリートも用いて検討したが、型わく寸法の大きいほうがコンクリートの回転現象は顕著でない(写真-1.5.6 参照)。

写真-1.5.6 供試体寸法による締め固め断面の比較

(1) 非造粒型S骨材コンクリート

(2) 川砂利、川砂コンクリート



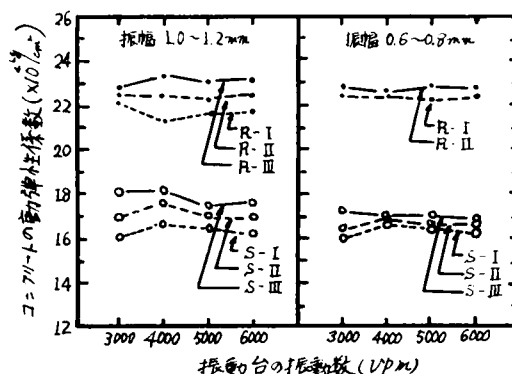
締固め断面の観察によって、ごくかた練りの場合、振動時間を長くした場合、角ばった骨材を用いた場合、型わく寸法の小さい場合などに不規則な回転が起こりやすいことがわかる。<sup>7)</sup> Cusensは普通コンクリートについて検討し、10cm 立方の小さい型わくの場合、細骨材量の多い場合、振幅の大きい場合に回転が生じやすいと述べ、Powers<sup>70)</sup>も、締固めの際振幅があまり大きすぎると材料が分離し、型わくの中でコンクリートが回転することがあると述べている。

コンクリートの締め固め中に回転を生じた場合は、型わくのなかで移動を示すので頂面でも観察することができる。寸法の大きい板状製品では、回転を生じる可能性は少ないが、歩道用ブロック類の小型製品では不規則な回転を生じると締固め効果が劣るので、締固め成形の際に注意する必要がある。<sup>7)</sup> Cusens は、回転を避けるには振幅を小さくするとよいと述べている。

5) コンクリートの動弾性係数について

圧縮強度試験の前に動弾性係数を求めたので、この値と振動数との関係を示すと図-1.5.6 のようになり、振動数4000 vpm で締め固めた場合にもっとも高い動弾性係数を示しているものが多いが、圧縮強度に比べて振動数による差が小さく、強度の場合ほど明瞭な傾向はえられていない。凍害抵抗性や耐酸性の試験における同一供試体の品質の変化をみる場合のように

図-1.5.6 振動数が動弾性係数におよぼす影響

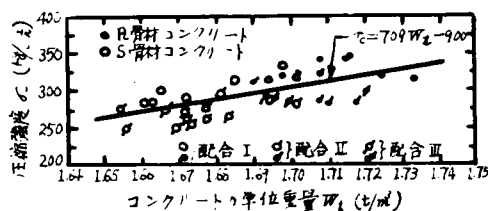


正確な判断の基準にはできないが、おおよその締固め効果の判断は可能であるといえよう。製品工場では、実際の製品に適用できる超音波法や反発硬度法の利用も便利であると思われる。

6) コンクリートの単位重量について

R骨材およびS骨材コンクリートとも、図-1.5.7のように単位重量の増加とともに圧縮強度も高くなる傾向があり、両者には密接な関係のあることを示しているが、ばらつきが大きくしか

図-1.5.7 コンクリートの単位重量と圧縮強度との関係



もその増加率が小さい。これは、振動数が高くなったり、振動時間が長くなると空けきが排除されて、重量が増すが、材料分離のため強度は同程度であったり、なかには低下するものもあるためや配合の差異の影響のためと思われる。

結局、単位重量も締固め効果を判定する一つの基準ではあるが、材料分離の影響のため重量が増加したものが強度が高くなるとはかぎらず、このような小型供試体では単位重量で締固め効果を判定するのは少し無理があるように思われる。しかし、実際の工場で製造されているブロックのように配合も一定で、寸法が多少大きくなると、前章でも述べたように重量によって品質の管理を行なうことは十分可能と思われる。

### § 3. かた練り人工軽量骨材コンクリートの基礎的性質

#### (1) 実験の概要

人工軽量骨材は前節の実験に用いた造粒型の R 骨材と非造粒型の S 骨材とを十分にブレイクして使用した。比較用の普通骨材（記号：N）は最大寸法 20mm の吉野川砂利（比重＝2.62、吸水量＝1.13%）と川砂（比重＝2.62、吸水量＝1.01%、粗粒率＝2.72）を用いた。セメントは普通ポルトランドセメント（比重＝3.15、28日圧縮強さ＝40.6  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ）で、コンクリートは表-1.5.5 に示す配合を用いた。すなわち目標スランプを3種にかえた AE 剤を用い

表-1.5.5 使用コンクリートの配合

骨材の種類	配 合 No.	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の 範 囲 (%)	単位水量 W (kg)	単位セメン ト量 C (kg)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 AE 剤量 (cc)
造 粒 型 R 骨 材	R-I	15	1±0.5	—	155	330	47.0	48	—
	R-II	15	3±1	—	164	330	49.7	46	—
	R-III	15	6±1	—	170	330	51.5	44	—
	R <sub>R</sub> -I	15	1±0.5	—	155	430	36.0	43	—
	R <sub>R</sub> -II	15	6±1	—	168	430	39.1	39	—
	R <sub>A</sub> -I	15	1±1	5±1	141	330	42.7	45	165
	R <sub>A</sub> -III	15	6±1	5±1	151	330	45.8	41	132
非造粒型 S 骨 材	S-I	20	1±0.5	—	145	330	43.9	48	—
	S-II	20	3±1	—	150	330	45.5	46	—
	S-III	20	6±1	—	156	330	47.3	44	—
	S <sub>R</sub> -I	20	1±0.5	—	142	430	33.0	43	—
	S <sub>R</sub> -II	20	6±1	—	153	430	35.6	39	—
	S <sub>A</sub> -I	20	1±0.5	5±1	129	330	39.1	45	198
	S <sub>A</sub> -III	20	6±1	5±1	135	330	40.9	41	165
川砂利・川砂 N 骨 材	N-I	20	1±0.5	—	148	330	44.8	46	—
	N-II	20	3±1	—	157	330	47.6	44	—
	N-III	20	6±1	—	162	330	49.1	42	—
	N <sub>R</sub> -I	20	1±0.5	—	147	430	34.2	41	—
	N <sub>R</sub> -II	20	6±1	—	158	430	36.7	37	—
	N <sub>A</sub> -I	20	1±0.5	5±1	132	330	40.0	43	165
	N <sub>A</sub> -III	20	6±1	5±1	140	330	42.4	39	132

注) 成形温度：16～20°C の配合

ないブレンコンクリートのほか、PC用の富配合2種、AE剤を用いたもの2種、計7種の配合を各骨材について選定した。

供試体の成形には、圧縮強度および動弾性係数の測定用に $\phi 10 \times 20$  cmの円柱形型わく、引張強度試験用に $\phi 15 \times 30$  cm円柱形型わく、曲げ強度と乾燥収縮測定用に $10 \times 10 \times 40$  cmはり型わくを用いた。

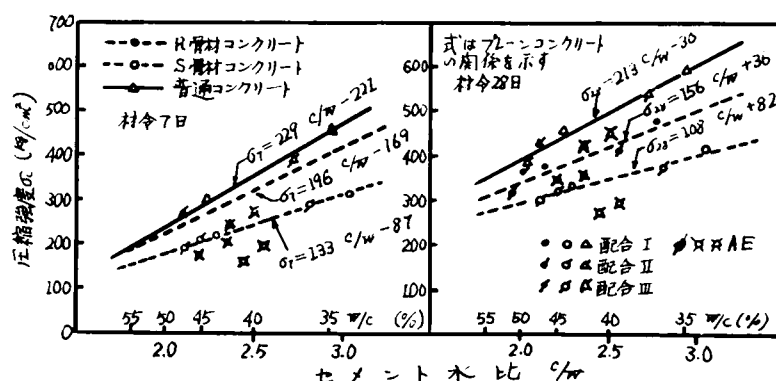
コンクリートは強制練りミキサで練り混ぜたのち、低振動数用の振動台に、 $\phi 10 \times 20$  cmの円柱形型わくは一度に6個、 $\phi 15 \times 30$  cmおよび $10 \times 10 \times 40$  cmの型わくは2個固定し、前節の研究結果を参考にして振動数4000 vpm、振幅1.0 mm、最高振動数での締固め時間を10秒として締め固め、比較のため普通コンクリートも同じ条件で締固め成形した。成形後、供試体は翌日脱型し、材令28日まで $20 \pm 2$  deg の水中で養生したのち、圧縮強度、曲げ強度、引張強度、静弾性係数、動弾性係数などを測定した。なお、乾燥収縮は材令7日以後水中より取り出し温度 $20 \pm 2$  deg、相対湿度60～85%の恒温室に放置し、コンパレータ法により乾燥収縮ひずみを測定した。

## (2) 実験結果とその考察

### 1) 圧縮強度について

圧縮強度とセメント水比との関係を示すと図-1.5.8のようになり、本実験では水セメント比の範囲が15%程度で比較的狭いので1次式で示される。軽量コンクリートでは骨材の一部が破碎し、コンクリートの強度がセメントペーストの強度に比例して増加しないので、セメン

図-1.5.8 セメント水比と圧縮強度との関係



ト水比が大きくなると勾配がゆるくなることが報告<sup>87)</sup>されているが、この材令28日の結果でも水セメント比4.3～5.2%付近の測定値のみで直線をひくとやや勾配が大きくなる傾向がうかがわれる。

同一水セメント比の場合、普通コンクリートに比べてR骨材では83～85%、S骨材では68～75%の強度となり、水セメント比が小さくなるほど強度差は大きくなるが、富配合にするとR骨材で約 $480 \text{ Kg/cm}^2$ 、S骨材ではおおそ $420 \text{ Kg/cm}^2$ の圧縮強度を示している。従来の研究結果<sup>104)</sup>では $500 \text{ Kg/cm}^2$ の値もえられており、PC製品用としても十分な強度を示している。なお、AEコンクリートにすると、同一セメント量のNon AEコンクリートに比べて水セメント比は5～6%低下し、その強度はNon AEコンクリートの82～95%の値を示している。

つぎに、セメント $100 \text{ Kg}$ の増量による圧縮強度の増進を調べると表-1.5.6に比べて軽量コンクリートのほうが小さい。これは、富配合にした場合、軽量骨材の影響による強度の伸び



なやみを示すものであり、比重の小さいS骨材のほうが顕著である。なお、配合Ⅲ（スランブ6

表－1.5.6 単位セメント量と材令28日の圧縮強度

骨材の種類	配合No.	単位セメント量 330 Kgの強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	単位セメント量 430 Kgの強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	単位セメント量 による強度差 (Kg/cm <sup>2</sup> )
R骨材	I	380	479	99
	Ⅲ	314(66)*	415(64)	101
S骨材	I	333	418	85
	Ⅲ	303(30)	373(45)	70
N骨材	I	453	594	141
	Ⅲ	383(70)	545(49)	162

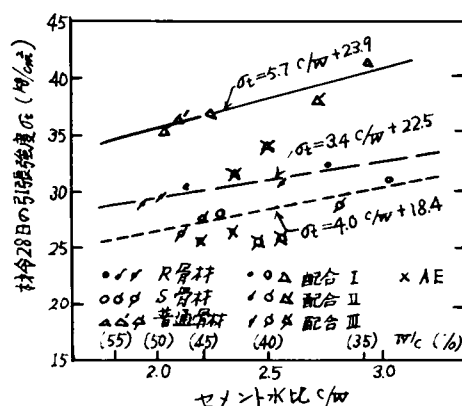
( )内は配合Ⅰと配合Ⅲの強度差

cm)から配合Ⅰ（スランブ1cm）になると単位水量は10～15Kg小となり、圧縮強度は平均で50Kg/cm<sup>2</sup>増加しており、軽量コンクリートでも経済配合を選ぶ上からは施工の許す範囲内でできるだけかた練りにするのが有利である。

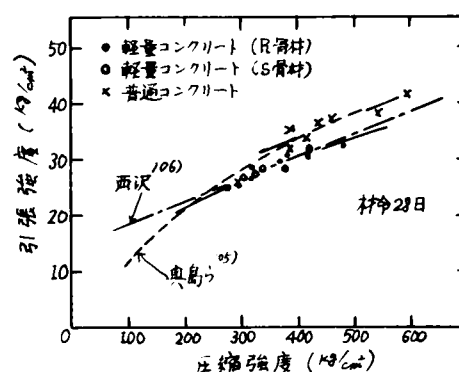
## 2) 引張強度について

セメント水比と引張強度との関係を示した図－1.5.9にみられるように、同一水セメント比の

図－1.5.9 セメント水比と引張強度との関係



図－1.5.10 引張強度と圧縮強度との関係



場合、軽量コンクリートの引張強度は普通コンクリートに比べてR骨材で80～83%、S骨材で74～76%の値であり、圧縮強度とほぼ同じ比率となっている。また、AEコンクリートにすると同一セメント量のNon AEコンクリートの87～96%の値となっている。

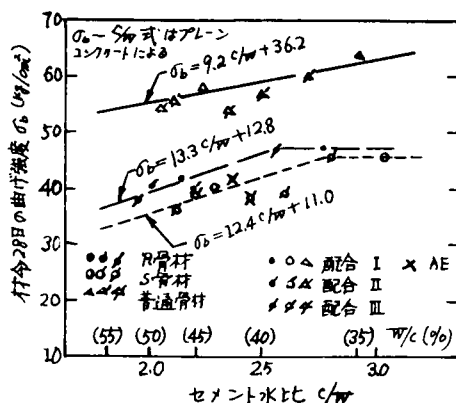
圧縮強度と引張強度との関係は100～400Kg/cm<sup>2</sup>の圧縮強度の範囲では普通コンクリートと軽量コンクリートとはほぼ同じであると報告されている<sup>105)</sup>が、400Kg/cm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートになると図－1.5.10に示したように軽量コンクリートではやや低くっており、西沢<sup>106)</sup>の研究結果とはほぼ同じ値となっている。もろさ係数(σc/σt)で示すと、普通コンクリートで1.1～1.4、軽量コンクリートでは1.1～1.5の値となっている。

## 3) 曲げ強度について

図－1.5.11のように普通コンクリートの曲げ強度はセメント水比の増加とともに大となるが、軽量コンクリートでは45～47Kg/cm<sup>2</sup>以上になると頭打ちになる傾向がみられ、限界曲げ強度が存在しているように思われる。西沢の研究<sup>106)</sup>によると、550Kg/cm<sup>2</sup>の高強度軽量コンクリートで約50Kg/cm<sup>2</sup>の曲げ強度がえられているので、軽量骨材の種類、供試体寸法、載荷方法など

によってことなるが  $5.0 \text{ kg/cm}^2$  前後が限界値と思われる。しかし、細骨材に川砂を用いた西岡の

図 - 1. 5. 11 セメント水比と曲げ強度との関係



報告<sup>107)</sup>によると、水セメント比45%、単位セメント量453～480 kgのコンクリートで62～69 kg/cm<sup>2</sup>のかなり高い曲げ強度がえられており、軽量コンクリートの曲げ強度や引張強度を向上するには川砂の使用が有利である。つぎに、曲げ圧縮比を求めると、軽量コンクリートで $\frac{1}{8}$ ～ $\frac{1}{10}$ 、普通コンクリートでは $\frac{1}{7}$ ～ $\frac{1}{9}$ となっており高強度になるほどその比は小となる。

なお、AEコンクリートの曲げ強度は、同一水セメント比のNon AEコンクリートの94～97%の値であり、他の強度に比べて差が小さくなっているが、はり型わくは打込み高さが低いので締固め効果がよく、気ほう排除が大きいためではないかと考えられる。

#### 4) 弾性係数について

3種骨材を用いたコンクリートの動弾性係数と圧縮強度との関係を図 - 1. 5. 1 2 に示す。両者の関係は指数式で示されるが、同一圧縮強度の場合に普通コンクリートの動弾性係数に比べてR骨材コンクリートでは約65%、S骨材では約50%の値である。なお、同一供試体で静弾性係数も求めたので動弾性係数との関係を示すと図 - 1. 5. 1 3 のようになる。両者の比は軽量コンク

図 - 1. 5. 1 2 動弾性係数と圧縮強度との関係

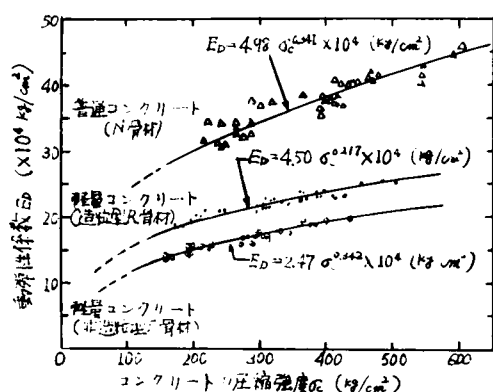
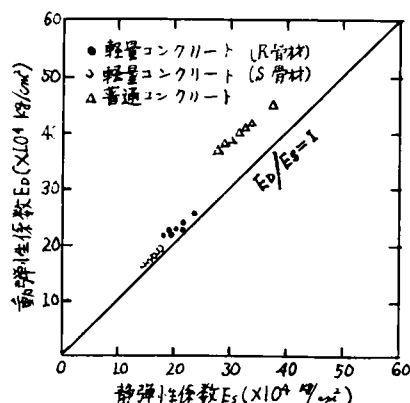


図 - 1. 5. 1 3 静弾性係数と動弾性係数との関係



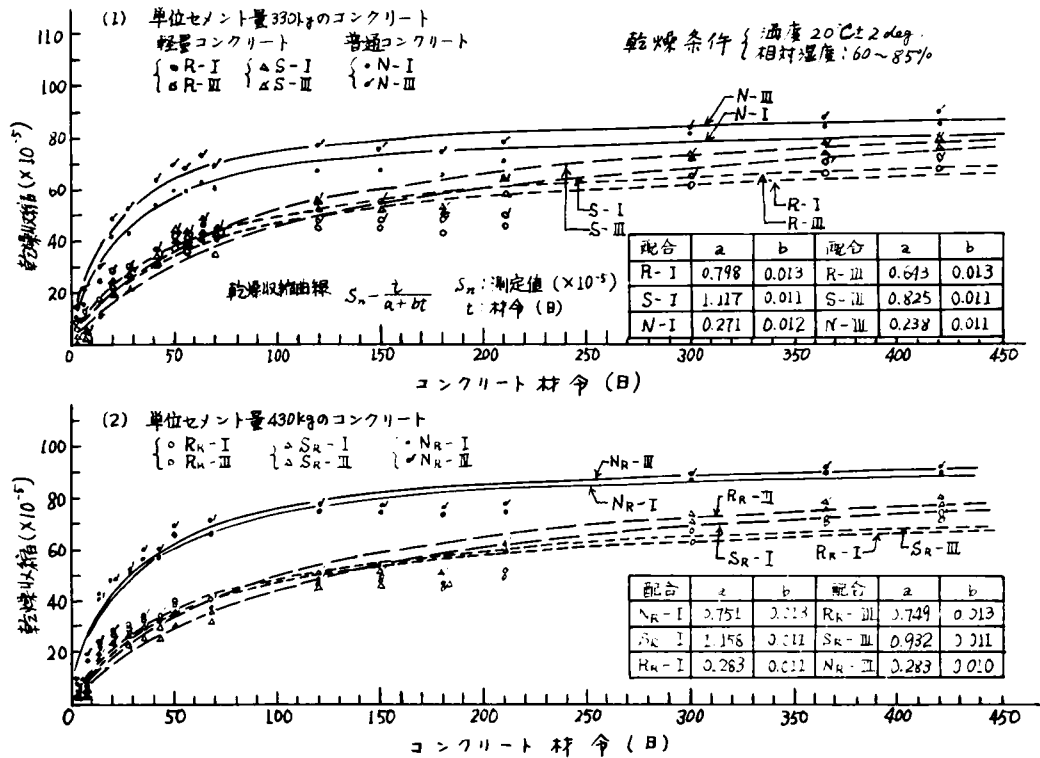
リートで約1.1、普通コンクリートでは約1.3であり、奥島ら<sup>108)</sup>の建築用のスラブの大きいコンクリートで報告された結果と大差をい値となっている。

#### 5) 乾燥収縮について

造粒型および非造粒型の2種の人工軽量骨材と川砂利、川砂を用い、セメント量、スラブなどの配合をかえたかた練りコンクリートについて、420日の長期にわたり乾燥収縮を測定した

結果を図-1.5.14に示す。この結果にみられるように軽量コンクリートの乾燥収縮は材令90～120日では普通コンクリートの $\frac{2}{3}$ 程度であるが長期材令の360～420日に至ると

図-1.5.14 各種コンクリートの乾燥収縮測定結果



軽量骨材の種類によってこととなるが、おおよそ80～90%の値となっており、さらに長期になると差が少なくなる傾向がある。なお、材令420日までの結果で、骨材の種類が同じなら、単位水量の多い配合Ⅱのコンクリートほど明らかに乾燥収縮は大となっている。また、単位セメント量が430kgのコンクリートは330kgのものに比べて多少大きくセメントペースト量が乾燥収縮ひずみに影響することを示している。

一般に、練り混ぜの際に加えた水のコンクリート中における状態を骨材の吸水量を別にして考えてみると、①水和につかわれるセメントの化学的結合水、②セメントゲル中に存在する吸収水、③コンクリート中の空けきに存在する自由水、になる。時間の経過とともにゲル中の吸収水の一部はセメント粒子と反応して結合水となり水合物にかわるが、この反応はかなり長期にわたる。自由水は遊離水とも呼ばれ、ゲル間の小孔や空けきに存在する。セメントペーストの完全結合水量はおおよそ7%程度と報告されているので、水セメント比の大きいコンクリートでは自由水、吸収水が多くなる。コンクリートが乾燥状態に放置されると、この自由水や吸収水あるいはコンクリート表層部では骨材中の水も外部に放出され、この結果乾燥収縮を受けることになる。骨材も乾燥すると収縮するがセメントペーストに比べるときわめて小さく、コンクリートの乾燥収縮は主としてセメントペースト中の吸収水や自由水の脱出に支配され、単位水量や単位セメント量の多いコンクリートは、それだけ乾燥収縮が大となる。

人工軽量骨材コンクリートの単位水量は普通コンクリートと同程度かやや多いが、骨材の吸水量がきわめて大きく乾燥によるコンクリート供試体の重量減少率は普通コンクリートよりかなり大である。しかし、乾燥収縮が小さいのは、骨材中の水がセメントペースト中の吸収水の脱出を遅らせるため、ペーストの乾燥が徐々にしかも長期にわたって進むものと考えられる。

したがって、造粒型 R 骨材と非造粒型の S 骨材との乾燥収縮を比較すると、吸水量の多い S 骨材を用いたコンクリートの短期材令の収縮は R 骨材を用いたものより小となっているが、長期材令では逆に大となり、乾燥収縮曲線よりその収縮ひずみ ( $1/b \times 10^{-8}$ ) を求めると普通コンクリートと同程度となっている (図-1.3.14 参照)。なお、R 骨材を用いたものは普通コンクリートよりやや小さい。

人工軽量骨材コンクリートの乾燥収縮については、国分、<sup>110)</sup>六車ら<sup>111)</sup>、西林ら<sup>112), 113)</sup>をはじめ多くの研究結果が報告されているが、<sup>114)~118)</sup>使用骨材、配合、供試体寸法、測定条件、材令などの相違のために研究者によって多少こととなった見解が示されており、できるだけ長期材令にわたって測定し考察する必要があると考える。Shideler<sup>114)</sup>は、材令 1 年の測定結果より高強度コンクリートでは、普通骨材を用いたものと軽量骨材を用いたものの差は小さいと述べている。

なお、PC 製品ではクリープも重要になるが、西林ら<sup>112), 113)</sup>は骨材の種類によってことなるが普通コンクリートの 1 ~ 1.5 倍であり、最終クリープ係数は 1 ~ 1.5 であると述べている。

また、耐久性とくに凍結融解に対する抵抗性は普通コンクリートに比べて劣るが、AE コンクリートにしたり細骨材に川砂を用いることによつてかなり改善されると報告されている。<sup>110), 119), 120)</sup>

以上のように人工軽量骨材コンクリートは川砂利を用いたものと多少性状がことなる点もあり、分離も起こしやすいので配合設計<sup>121)</sup>や施工にあつては十分な配慮が必要である。

#### § 4. 結 語

造粒型および非造粒型の 2 種の人工軽量骨材を用いたかた練りコンクリートの振動台による締固めについて検討し、さらに振動台で締め固めたコンクリートの硬化後の諸性質について、川砂利コンクリートと比較して調べた本章の研究結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 軽量コンクリートの振動台による最適締固め条件は、造粒型と非造粒型のような骨材粒子の形状によって多少ことなるが、振動数 3000 ~ 4000 vpm、振幅 0.8 ~ 1.0 mm、振動加速度 5 ~ 10 g が適当であり、普通コンクリートに比べて多少低い振動数で締固めが可能である。
- (2) 軽量コンクリートの振動台による締固め過程は比較的短い時間で行なわれるので普通コンクリートより振動締固め時間を短縮することができる。振動時間が長くなると、粗骨材の浮上による材料の分離や、型わく中でのコンクリートの不規則な回転などのため強度低下の傾向を示す。
- (3) コンクリートの不規則な回転移動は、鉛直回転方式の振動台で、小型の型わくを用いた場合、スランプの小さいコンクリートの場合、振動時間を必要以上に長くとした場合に起こりやすい。
- (4) かた練り軽量コンクリートの普通コンクリートに対する圧縮強度比は、水セメント比が同じ場合、R 骨材で 83 ~ 85 %、S 骨材では 68 ~ 75 % の値であり、単位セメント量 430 kg の富配合コンクリートでは R 骨材でおおよそ 480 kg/cm<sup>2</sup>、S 骨材では 420 kg/cm<sup>2</sup> 程度の高強度がえられている。
- (5) 軽量コンクリートの曲げ圧縮比は  $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{10}$ 、引張圧縮比は  $\frac{1}{11} \sim \frac{1}{15}$  であり、この比は高強度になるほど小となり、普通コンクリートよりわずかに小さい。また、静弾性係数と動弾性係数との比はおおよそ 1.3 であり、普通コンクリートの 1.1 より大きい。
- (6) かた練り軽量コンクリートの乾燥収縮は、同一セメント量の場合、材令 420 日までは普通コンクリートより小さい。骨材の種類が同じならば、単位セメント量の多いものほどまた単位水量の多いものほど収縮は大きくなる。なお、乾燥収縮曲線より終極ひずみを求めると、S 骨材を用いたものは普通コンクリートと大差なく、R 骨材コンクリートはやや低い値を示している。

## 第 6 章 型わくの形状、寸法および材質の影響

### § 1. 緒 言

コンクリート製品に用いる型わくは、締固めの際に強い振動を与えたり、蒸気養生を行なう場合は熱変形を受ける上に何十回、何百回と繰返し使用しなければならないので、堅固で耐久性に富むものでなければならず、さらに寸法の精度が要求され、組立て、取りはずしの簡単なものが望まれる。

一般に、鋼製型わくが適しているが重いという欠点があり、できるだけ重量を軽減するために板厚を薄くしてフレームをつけたものを使用している。軽くて取扱いの容易な木製型わくは寸法精度や使用回数が鋼製型わくに比べて劣り、小型の製品や特殊な形状の製品をつくる場合以外はあまり用いられなくなっている。最近、一部には強化プラスチックを用いた合成樹脂製の型わくも使用されるようになっているが、<sup>122)</sup> 使用回数、耐久性などが劣るので振動台で締め固める製品には、一般に鋼製型わくが用いられている。

コンクリート製品の締固めを行なう場合、型わくの形状、寸法、材質などは振動締固め効果と密接な関係があると思われるが、これらの影響について研究した結果はきわめて少なく、第 2 章の既往の研究でも述べたように、Cusens<sup>7)</sup>やKolek<sup>34)</sup>の報告があるが、コンクリートの品質の影響も考慮して、今後さらに研究する必要があると考える。

したがって、型わくの影響について基礎的な資料をえるため、実験室で鋳鉄製と木製のコンクリート試験用型わくを用いて、とくに型わくの寸法および材質が締固め効果におよぼす影響を調べ、さらにコンクリートの種類をかえて検討を行なった。<sup>67)123)</sup>

### § 2. 寸法および材質の強度におよぼす影響

#### (1) 実験の概要

セメントは普通ポルトランドセメント（比重＝3.15、28日圧縮強さ＝406 Kg/cm<sup>2</sup>）を用い、粗骨材は吉野川産の川砂利で、30～20 mm、20～10 mmおよび10～5 mmの3種粒度区分にふるい分け、最大寸法は30 mmと20 mmのものを用いた。細骨材は5～1.2 mmと1.2 mm以下に分け、この比率を1：4の割合で混合し、粗粒率が2.72のものを使用した。コンクリートは表－1.6.1に示す最大寸法のことなる2種の配合を用いた。

表－1.6.1 使用した普通コンクリートの配合

配合の 種 類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブの 範 囲 (cm)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (Kg/m <sup>3</sup> )			
					水 W (Kg)	セメント C (Kg)	細 骨 材 S (Kg)	粗 骨 材 G (Kg)
P-20	20	2～3	46.9	3.9	150	320	838	1069
P-30	30	2～3	44.4	3.9	142	320	752	1136

型わくは寸法と材質の影響を調べるため表－1.6.2に示した各種型わくを使用した。すなわち、圧縮強度試験用の円柱形型わくと曲げ試験用のはり型わくについて検討し、材質ははり型わくの、み木製と鋳鉄製の2種にかえた。木製型わくは板厚18 mmのラワン材を用い、ボルトと釘で固定し振動に耐えられるものとした。なお、型わく数は1種につき4個とした。

コンクリートの練りませには強制練りミキサを用い、モルタルで1分、粗骨材を投入して1分練りませたのち、上述の型わくに詰め、低振動数用の振動台に型わく2個を取り付け、振動数5000

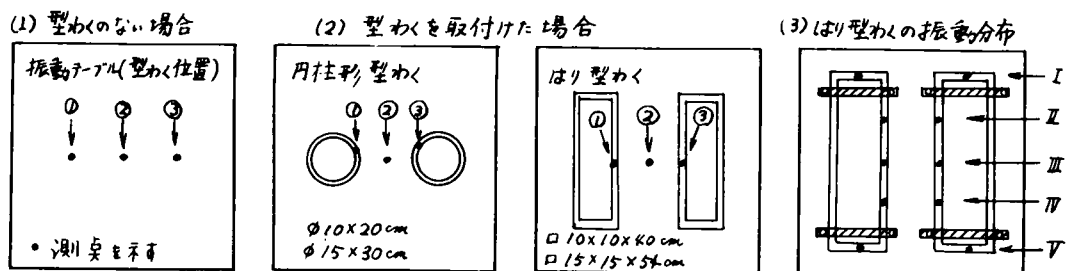
表- 1. 6. 2 使用した型わくの種類

形 状	材 質	寸 法 (cm)
円柱形 型わく	鋳 鉄	$\phi 10 \times 20$
		$\phi 15 \times 30$
は り 型 わ く	鋳 鉄	$10 \times 10 \times 40$
		$15 \times 15 \times 54$
	木	$10 \times 10 \times 40$
		$15 \times 15 \times 54$

vpm、振幅約 0.8 mm、この振動数での締固め時間を 20 秒として成形を行なった。締固めを終えた供試体は翌日脱型し、材令 28 日まで水中養生を行なった。所定材令で円柱供試体はその重量と動弾性係数とを求めたのち圧縮強度試験を行ない、はり供試体は曲げ強度試験を行なった。

型わくの寸法や材質がことになると、コンクリートを詰めたときの重量や打込み高さがことなるので、これが振動締固め効果に影響すると考えられるので、日本測器製<sup>KK</sup>の加速度振動計を用いて、①型わくを取り付けない場合、②型わくを取り付けた場合、③コンクリートを投入し締め固める場合について図- 1. 6. 1 のように測点を 3 カ所とり、振動加速度と振幅の測定を行なった。

図- 1. 6. 1 振動テーブルの型わく位置と振動の測点



なお、 $10 \times 10 \times 54$  cm の木製と鋳鉄製のはり型わくについては、型わく上面に 5 点ブラグを取り付け、型わくの加速度および振幅の分布も測定した（図- 1. 6. 1 (3) 参照）。

## (2) 実験結果とその考察

### 1) 型わく寸法の影響について

型わくの寸法をかえて振動数 5000 vpm で締め固めたコンクリートの圧縮強度および曲げ強度を表 1. 6. 3 に示す。まず、円柱形型わくの圧縮強度では、 $\phi 15 \times 30$  cm の標準寸法のもの

表- 1. 6. 3 型わくの寸法のことなつた場合のコンクリートの強度

強 度		圧 縮 強 度		曲 げ 強 度		強 度	
型 わ く の 材 質		鋳 鉄		鋳 鉄		木	
型 わ く の 寸 法 (cm)		$\phi 10 \times 20$	$\phi 15 \times 30$	$10 \times 10 \times 40$	$15 \times 15 \times 54$	$10 \times 10 \times 40$	$15 \times 15 \times 54$
最大寸法 20 mm	平均値 (Kg/cm <sup>2</sup> )	414	423	59.8	55.2	61.0	55.9
	強度比	98	100	108	100	109	100
	変動係数 (%)	4.8	2.6	5.6	3.6	7.4	5.0
最大寸法 30 mm	平均値 (Kg/cm <sup>2</sup> )	434	425	59.7	56.0	62.0	56.2
	強度比	102	100	107	100	110	100
	変動係数 (%)	4.2	2.2	2.2	2.0	5.9	5.5

と小型の $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ との値を比較すると、使用した骨材の最大寸法によってわずかにことなるが供試体4個の変動係数よりみて両者の値はほぼ同じであるといえる。棒形振動機で締め固めた場合の、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ と $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ 円柱供試体の圧縮強度比に関する既往の研究結果をまとめると表-1.6.4に示すような値がえられており、実用上強度は同じとしてさしつかえないと結論づけられる。なお、笠井<sup>127)</sup>は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の強度は $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ の場合より1%程度ばらつきが大きくなったと報告しているが、振動台で締め固めた本実験の結果でも変動係数は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ のほうが多少大となっている。また、圧縮強度試験の前に求めた

表-1.6.4 円柱供試体の圧縮強度におよぼす型わく寸法の影響

研 究 者		H. F. <sup>124)</sup> Gomernon	Lyse and <sup>125)</sup> Johansen	杉 本 <sup>126)</sup>	笠 井 <sup>127)</sup>	奥 島 <sup>128)</sup>	日本セメント技術協会 <sup>129)</sup> コンクリート委員会
強 度 比	範 囲	0.95~1.15	0.90~1.10	0.95~1.10	0.92~1.05	0.88~1.14	0.96~1.04
$\phi 10/\phi 15$	平均値	1.01	1.02	0.99	0.98	1.04	1.00

動弾性係数は、最大寸法 $20 \text{ mm}$ のコンクリートでは両寸法とも $4.05 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ と同じ値であり、最大寸法 $30 \text{ mm}$ では $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ が $4.06 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ では $4.09 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ で、ほぼ同じとなっている。

2種の円柱形型わくの上面の測点にピックアップを取り付け、振動加速度と振幅とを測定すると表1.6.5のようになり、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ のほうがいくぶん大きい、この程度の差では締

表-1.6.5 円柱形型わくの上面における加速度と振幅

測 定 条 件 と 測 定 値	コンクリートを入れない場合		コンクリートを入れた場合	
	振 幅 ( $\text{mm}$ )	加 速 度 ( $\text{g}$ )	振 幅 ( $\text{mm}$ )	加 速 度 ( $\text{g}$ )
$\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 型わく	0.66	8.7	0.82	8.4
$\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ 型わく	0.62	8.2	0.76	8.0

固め効果にほとんど影響しなかったものと考えられる。

つぎに、はり型わくで曲げ強度を測定した場合、鋳鉄製、木製の場合とも明らかに口 $15 \times 15 \times 54 \text{ cm}$ より口 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ のほうが7~10%強度は大となっている。棒形振動機を使用した北田ら<sup>130)</sup>の報告では供試体寸法が小さいほど曲げ強度は高いが、口 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ と口 $15 \times 15 \times 54 \text{ cm}$ では差が少ないと述べている。本実験結果では多少差が大きい、これは、はり型わくの振動測定結果を示した表-1.6.6にみられるように、両型わくの重量差が大となるので、円柱形型わくの場合に比べると寸法による加速度や振幅の測定値の差の

表-1.6.6 はり型わくの上面における加速度と振幅

測 定 条 件 と 測 定 値		コンクリートを入れない場合			コンクリートを入れた場合		
		重量( $\text{kg}$ )	振 幅 ( $\text{mm}$ )	加速度( $\text{g}$ )	重量( $\text{kg}$ )	振 幅 ( $\text{mm}$ )	加速度( $\text{g}$ )
口 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$	鋳 鉄	14.7	0.63	8.3	33.8	0.70	8.0
	木	3.2	0.70	9.3	12.5	0.72	8.8
口 $15 \times 15 \times 54 \text{ cm}$	鋳 鉄	28.2	0.52	6.9	55.0	0.54	6.4
	木	14.7	0.63	8.4	23.7	0.58	7.6

注1) コンクリートを入れた場合振動時間5~10秒で測定

注2) 重量は型わく1個について測定した値

大きいことや振動中の型わく上面の加速度の変化を測定した結果を示した表－ 1. 6. 7 のように、型わくが大きくコンクリート量が多いと振動が吸収され、締固め時間の経過とともに加速度が小となる傾向が著しいためと思われる。

表－ 1. 6. 7 振動締固め時間による加速度の変化の一例

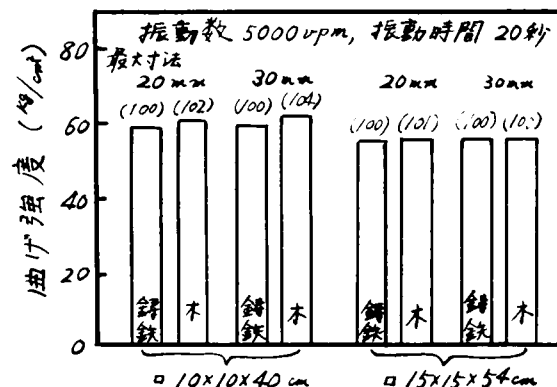
鋳鉄製型わくの種類	振動時間 ( sec ) と 加 速 度 ( g )						
	0	5	10	15	20	25	30
φ 10×20cm 円柱形	9.9	9.5	10.0	9.4	9.5	9.3	9.4
□ 10×10×40cm はり	8.2	8.0	8.1	8.0	7.7	7.8	7.6
□ 15×15×54cm はり	6.3	6.3	6.8	5.0	5.8	4.8	4.4

注) 型わくにコンクリートを詰め、型わくの上面で測定

## 2) 型わくの材質の影響

振動締固め効果におよぼす型わくの材質の影響について、Cusens<sup>7)</sup> は、木製型わくだと高振動数で締固めた場合に振動が吸収されるので低振動数でしかも高振幅を用いるのがよいと報告している。本実験で用いた鋳鉄製と木製はり型わくについて両者の曲げ強度を比較すると図－ 1. 6. 2 のとおりであり、□ 10×10×40cm の小型型わくでは木製のほうがわずかに大きい

図－ 1. 6. 2 型わくの材質による曲げ強度の比較



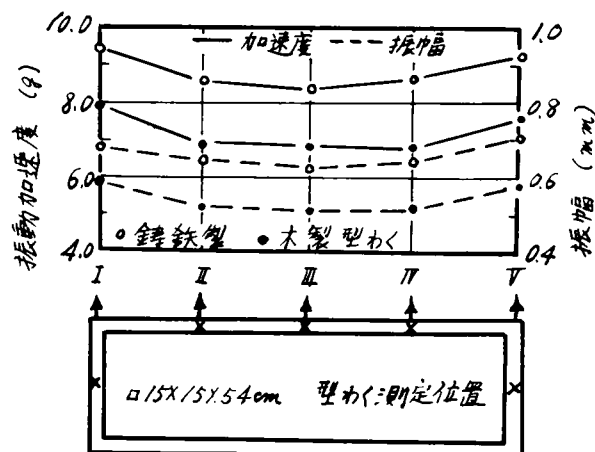
が、□ 15×15×45cm では両者ともほぼ同じ値となっている。曲げ強度の変動係数は、表－ 1. 6. 3 にみられたように木製型わくが明らかに大きい、型わくのそりの影響もあったのではないと思われる。なお、コンクリートのはだ面については大差ないが、どちらかというといふと鋳鉄製のほうがやや良好であったが、はく離剤や木製型わくの表面のあれの影響もあると思われる。

なお、はり型わくの上面の 5 点における振動分布の測定値を示すと図－ 1. 6. 3 のように、鋳鉄製より木製型わくのほうが加速度、振幅とも大きい、これは重量の影響と思われる。また、端部のほうが大きいこれは固定点に近いと考えられる。

木製型わくは軽くて取扱いにはきわめて便利であり低振動数で高振幅の本実験に用いたような条件では、鋳鉄製と同様に締固め効果もよいが、使用回数、寸法のくるい、そり、はだ面などを考慮するとあまり得策ではないと考えられる。



図-1.6.3 はり型わく上面の振動分布の測定



### § 3. 各種コンクリートの振動締固め効果におよぼす型わくの影響

#### (1) 実験の概要

セメントは普通ポルトランドセメント（比重＝3.15、28日圧縮強さ＝41.3 kg/cm<sup>2</sup>）とし、骨材はコンクリートの種類をかえるため表-1.6.8に示すものを使用した。すなわち、最大寸法

表-1.6.8 使用した骨材の種類と品質

骨材の種類 品質	普通骨材			人工軽量骨材			
	粗骨材		細骨材	粗骨材		細骨材	
	川砂利	砕石	川砂	A骨材	B骨材	A骨材	B骨材
表乾比重	2.61	2.60	2.62	1.35	1.38	1.81	1.90
吸水量(%)	1.28	1.30	1.16	1.16	4.22	9.19	2.80
浮粒率(%)	—	—	—	6.1	2.3	—	—
粗粒率(FM)	6.77	6.61	7.81	6.58	6.58	3.15	2.97

20 mmの吉野川砂利と鳴門砕石、細骨材は吉野川砂利、人工軽量骨材は最大寸法15 mmで、非造

表-1.6.8 使用したコンクリートの種類

使用粗骨材	配合%	最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg)	単セメント 位置 (kg)	細骨材量 kgまたはm <sup>3</sup>	粗骨材量 kgまたはm <sup>3</sup>
川砂利 (G)	G-6	20	6 ± 1	50.9	44.6	163	320	836	1034
	G-2	20	2 ± 1	48.1	45.3	154	320	859	1034
砕石 (N)	N-6	20	6 ± 1	56.3	49.6	180	320	907	916
	N-2	20	2 ± 1	52.5	50.4	168	320	938	916
非造粒型 (A)	A-6	15	6 ± 1	51.6	44.0	165	320	0.309	0.394
	A-2	15	2 ± 1	47.8	47.0	153	320	0.336	0.379
造粒型 (B)	B-6	15	6 ± 1	55.3	44.0	177	320	0.304	0.387
	B-2	15	2 ± 1	50.9	47.0	163	320	0.331	0.374

粒型のA骨材（N社製）と造粒型のB骨材（O社製）でいずれも膨張頁岩である。単位セメント量は320Kgの一定とし、目標スランプ6cmと2cmとの2種とし、表-1.6.8に示す8種のコンクリート配合を用いた。

強制練りミキサを用いてコンクリートを練り混ぜたのち、前実験と同様の型わくを用いて締め成形し、その形状、寸法および材質が各種コンクリートの振動締め効果におよぼす影響を調べた。なお、2種の振動台を用い、その振動締め条件は表-1.6.10とした。なお、前実験では同

表-1.6.10 各種コンクリートの振動締め条件

振動台の種類	低振動数用振動台	高振動数用振動台
振動数(vpm)	5000	7200
振幅(mm)	1.0	0.28
締め時間(sec)	20	20
使用コンクリート	G-6 G-2 N-6 N-2 A-6 A-2 B-6 B-2	G-6 N-6 A-6 B-6

じ寸法の型わくを2個取り付けて同時に締めを行なったが、今回は $\phi 10 \times 20$ cmと $\phi 15 \times 30$ cmの円柱形、あるいは $10 \times 10 \times 40$ cmと $15 \times 15 \times 54$ cmのはりのように形状が同じで寸法の異なる型わくを2個取り付け、所定の締めを行なった。また前実験と同様の要領で、加速度振動計を用い、型わく取付け位置、型わくの上、などで型わくのみの場合、コンクリートを詰めた場合などについて振動測定を行なった（写真-1.6.1、写真-1.6.2参照）

所定の締めを行なった供試体は、翌日脱型してから材令28日まで20℃の標準養生を行い、円柱供試体では圧縮強度と動弾性係数、はり供試体では曲げ強度と折片圧縮強度とを求め、締め効果を比較した。なお供試体数は3本とした。

写真-1.6.1 加速度振動計と円柱型わくの振動測定

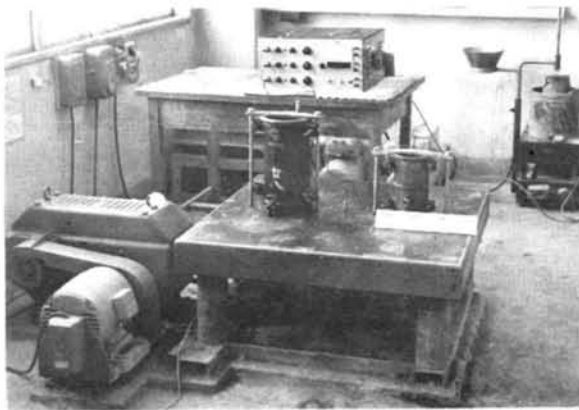
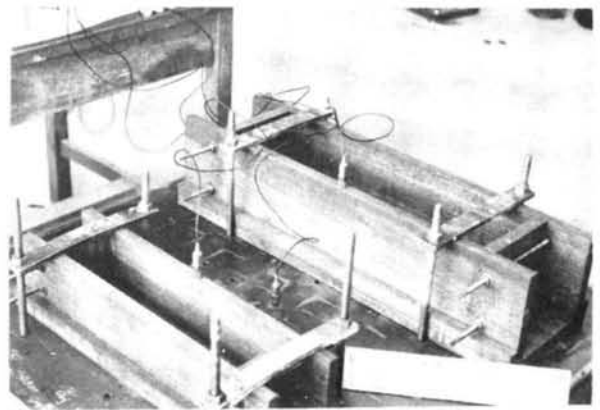


写真-1.6.2 木製はり型わくと測点の取付け



## (2) 実験結果とその考察

### 1) 円柱供試体の型わく寸法による影響

各種コンクリートについて、 $\phi 10 \times 20$ cmと $\phi 15 \times 30$ cm円柱形型わくで求めた圧縮強度を比較すると表-1.6.11のようになる。両者の強度比は0.96～1.06、平均1.00であり、この程度の寸法差では締め効果に差がないといえる。また、圧縮強度の変動係数も一定の傾向はみられないが、平均値で示すと $\phi 15 \times 30$ cmが2.9%、 $\phi 10 \times 20$ cmでは3.2%であり、前実験と同様に寸法の大きいほうがばらつきが小さくなる傾向がある。また、両供試体で求めた動弾性係数は各種コンクリートともほぼ同じ値となっており、圧縮強度に比べ寸法の影響が小さい。なお、型わく頂面で振動加速度を測定するとコンクリートを詰めた場合、 $\phi 10$

表- 1. 6. 1 1 円柱形型わくの寸法と各種コンクリートの圧縮強度

締固め 条 件	配 合 No.	$\phi 15 \times 30 \text{ cm}$			$\phi 10 \times 20 \text{ cm}$			強 度 比 $\frac{\phi 10}{\phi 15}$
		圧縮強度 ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	変動係数 (%)	$E_c$ ( $\times 10^4 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ )	圧縮強度 ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	変動係数 (%)	$E_c$ ( $\times 10^4 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ )	
5000 vpm	G-6	395	1.6	39.1	381	4.1	39.1	0.96
	G-2	404	4.2	39.9	393	2.0	40.2	0.97
	N-6	345	3.3	37.0	350	3.3	37.9	1.01
	N-2	397	2.2	38.8	387	2.7	38.3	0.97
	A-6	290	1.7	18.1	296	4.2	18.1	1.02
	A-2	302	7.1	18.4	308	7.2	18.6	1.02
	B-6	294	1.3	21.3	286	2.5	21.0	0.97
	B-2	322	4.0	21.9	342	2.2	22.7	1.06
7200 vpm	G-6	393	4.9	39.4	389	2.7	39.1	0.99
	N-6	354	1.3	37.8	370	1.9	37.7	1.05
	A-6	278	2.3	17.7	286	2.5	17.6	1.03
	B-6	280	0.6	20.7	280	3.1	21.0	1.00

注) 圧縮強度は供試体3本の平均値、 $E_c$  : 動弾性係数

$\times 20 \text{ cm}$ 型わくが $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ の場合より0.6~1.5%高いが、この程度の差では締固め効果にほとんど影響しなかったものと思われる。(表- 1. 6. 12参照)。

表- 1. 6. 12 振動台に円柱形型わくを取付け実施した加速度と振幅

振動台の 種 類	測 定 条 件	テーブル中央		$\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ 型わく		$\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 型わく	
		加速度( $g$ )	全振幅(mm)	加速度( $g$ )	全振幅(mm)	加速度( $g$ )	全振幅(mm)
低振動数* 振 動 台	型わくのみの場合	10.4	0.75	11.0	0.75	10.0	0.68
	川砂利コンクリートを詰めた場合	9.4	0.65	9.4	0.65	9.8	0.66
	軽量コンクリートを詰めた場合	9.2	0.64	8.5	0.61	9.3	0.63
高振動数** 振 動 台	型わくのみの場合	6.3	0.24	7.6	0.28	8.8	0.33
	川砂利コンクリートを詰めた場合	6.2	0.22	6.3	0.22	7.8	0.28

注) タコメーターの振動数5000 vpm、公称振動数7200 vpm

## 2) はり型わくの寸法および材質の影響

川砂利および碎石コンクリートについて、曲げ強度およびはり断片の圧縮強度を求めた結果を表- 1. 6. 13に示す。碎石コンクリートの曲げ強度は、配合N-6の平均が57.9  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ 、

表- 1. 6. 13 はり型わくの寸法および材質をかえた場合の川砂利および碎石コンクリートの曲げ強度と圧縮強度

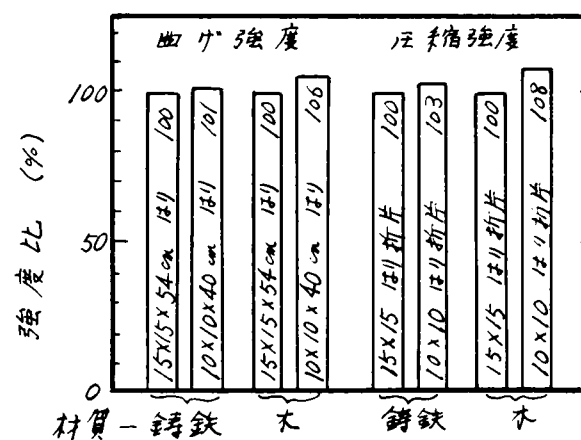
材料の種類 と配合No.	曲 げ 強 度 $Kg/\text{cm}^2$				圧 縮 強 度 $Kg/\text{cm}^2$			
	試 験 断 片		平均値		試 験 断 片		平均値	
	15×15×40	15×15×30	15×15×40	15×15×40	15×15×40	15×15×40	15×15×40	15×15×40
川砂利	G-6	57.5 (4.0)	55.1 (5.1)	56.0 (4.5)	39.5	40.1 (5.7)	39.8 (5.4)	39.8 (5.4)
	G-2	58.6 (6.0)	56.9 (4.5)	57.8 (5.3)	39.5 (4.7)	39.1 (5.7)	39.3 (5.4)	39.3 (5.4)
碎 石	N-6	57.4 (5.7)	56.1 (2.5)	56.8 (4.1)	41.7 (5.7)	41.7 (4.4)	41.7 (5.4)	41.7 (5.4)
	N-2	57.6 (6.5)	62.1 (5.9)	59.9 (4.1)	40.7 (5.6)	40.1 (4.1)	40.4 (4.8)	40.4 (4.8)

括弧内は強度の変動係数(%)を示す

かた練りのN-2で $60.1 \text{ Kg/cm}^2$ であり、砂利コンクリートはG-6が $55.6 \text{ Kg/cm}^2$ 、G-2が $58.4 \text{ Kg/cm}^2$ であるから、碎石コンクリートのほうが4~5%曲げ強度が高く、セメント協会の舗装用コンクリートを対象とした実験結果<sup>131)</sup>とほぼ同程度である。なお、横道ら<sup>77)</sup>の報告では、セメント量とスランプ一定では碎石と砂利を用いたコンクリートの曲げ強度比は1.13~1.20となっており、この値に比べると多少小さい。なお、はり折片の圧縮強度は、表-1.6.13に示したように川砂利より碎石コンクリートのほうがおよそ10%低い値となっている。

川砂利および碎石コンクリートとも強度試験結果の傾向がよく似ているので4種配合の値を平均して、材質別に型わく寸法による強度を比較すると図-1.6.4のようになり、寸法が小さくな

図-1.6.4 型わくの寸法が振動台で締め固めた普通コンクリートの強度におよぼす影響



ると強度は高くなる傾向を示している。これは、鑄鉄製に比べて木製型わくのほうが顕著であり、曲げ強度に比べてはり折片の圧縮強度のほうが寸法効果の影響は大となっている。

型わくの材質による影響を比較すると、表-1.6.14に示したように、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の小型型わくの場合には、前節で述べた実験結果と同様に、木製のものが鑄鉄製よりいくぶん高く

表-1.6.14 普通コンクリートを用いた場合の型わくの材質による強度の比較

型わく寸法	$15 \times 15 \times 54 \text{ cm}$		$10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$		平均
材質	鑄鉄製	木製	鑄鉄製	木製	(木製/鑄鉄製) × 100
型わく上面の加速度(g)	6.6	7.2	6.5	7.4	—
曲げ強度比	100	9.8	100	102	100
圧縮強度比	100	9.9	100	104	101

注) G-6、G-2、N-6、N-2配合の平均値

なる傾向がある。 $15 \times 15 \times 54 \text{ cm}$ の大きい型わくでは、逆に木製のほうがわずかに小となる傾向があるが、前実験でも指摘したように、これは木製型わくのそりの影響もあると考えられ、この程度の差では $15 \times 15 \times 54 \text{ cm}$ 型わくの場合材質による締め固め効果の差はないといえよう。

つぎに、造粒型と非造粒型の人工軽量骨材を用いたコンクリートについて、はり型わくの寸法と材質の影響を調べた結果を示すと表-1.6.15のようになり、普通コンクリートでえられた結果とややことなっている。すなわち、寸法比の値でみられるように、曲げ強度は $15 \times 15 \times 40 \text{ cm}$ の小型型わくの結果が明らかに大となっているが、圧縮強度では、鑄鉄製型わくの場合、

表— 1. 6. 1 5 はり型わくの寸法と材質による軽量コンクリートの強度の比較

型わくの寸法		□15×15×54cm		□10×10×40cm		寸法比 $\frac{10}{15} \times 100$	
材	質	鋳鉄製	木製	鋳鉄製	木製	鋳鉄製	木製
非造粒型	曲げ強度 ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	374(100)	42.0(112)	45.2(100)	46.9(104)	121	112
	圧縮強度 ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	377(100)	323((26)	356(100)	365(103)	94	113
造粒型	曲げ強度 ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	382(100)	41.6(109)	46.3(100)	45.4(98)	121	109
	圧縮強度 ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	383(100)	319(83)	35.2(100)	34.9(99)	92	109

注) 低振動数用振動台 5 0 0 0 vpm で 2 0 秒締固め

逆に数パーセント小となっている。とくに、粒形の丸い造粒型骨材にこの傾向が顕著になっており、材料の分離や不規則な回転の影響が現われたのではないと思われる。なお、材質の影響を比較すると、□15×15×54cmの木製型わくを用いた場合の圧縮強度が、鋳鉄製に比べてかなり低い、木製型わくでは弾性変形が大きいので横方向の振動もかなり大きく、材料分離のほかに型わくのそりの影響もあったものと思われる。

### 3) 型わくの形状の影響について

普通および軽量コンクリートを含めて型わくの形状による締固め効果への影響をφ15×30cm円柱供試体の圧縮強度と□15×15×54cmはり折片の値とで比較すると、はり折片の圧縮強度が10～25%、平均値で19%大となっている。Gonnerman<sup>124)</sup>の研究結果では、φ15×30cmと□15×15×15cmの立方供試体では、後者が13～18%高くなると報告しているが、この場合両端のはり出し部分の影響を考慮しなければならない。日本セメント技術協会コンクリート委員会の報告<sup>132)</sup>では、普通セメントを用い、最大寸法40mmの骨材でつくった無装用のかた練りコンクリートで、φ15×30cmの円柱供試体の圧縮強度と比較して、はり折片の圧縮強度は11～16%高くなっており、本実験の振動台で求めた結果がいくぶん大きい、両型わくとも大差ない締固め効果がえられていると考えられる。

## § 4. 結 語

小型の円柱形型わくおよびはり型わくを用い、使用骨材、最大寸法、スランブなど配合をかえたコンクリートを使用し、振動台の締固め効果におよぼす、型わくの形状、寸法、材質などの影響を検討した本章の結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) φ15×30cmの標準円柱形型わくとφ10×20cmの型わくを用いて振動台で締め固めたコンクリートの圧縮強度と動弾性係数は、両型わくの供試体ともほぼ同じ値であり、測定値のばらつきは供試体寸法の大きい前者がやや小さい。
- (2) 川砂利、砕石などを用いた普通コンクリートの曲げ強度およびはり折片の圧縮強度は、□15×15×54cmより□10×10×40cmの小型型わくのほうが大となり、締固め効果がよくなる傾向がみられる。
- (3) 鋳鉄製と木製との型わくの材質による影響は、□10×10×40cmの小型型わくでは木製のほうが強度はやや高くなる傾向があるが、型わく寸法が大きくなると締固め効果の差はみられない。
- (4) 軽量コンクリートを用いた場合には、一般に型わく寸法を小さくしたほうが曲げ強度や折片の圧縮強度は高くなるが、粒形によっては過振動となって材料分離の傾向を生じ、締固め効果を悪くすることがある。
- (5) 振動台に取り付けた型わくにコンクリートを詰めると、コンクリートの重量が積載されるので、振動加速度や振幅がやや小となる傾向がみられるが、本実験に用いた程度の寸法の範囲では締固め効果に与える影響は少ないと考えられる。
- (6) 木製型わくは軽くて取扱いが便利であり、本実験に用いたような低振動数が高振幅の条件では、締固め効果もよいが、□15×15×54cm型わくでは側板のそりの影響が若干みられ、寸法のくろいや使用回数を考慮すると鉄製に比べて不利であると考えられる。

## 第7章 超かた練りコンクリートの振動締固め

### § 1. 諸 言

土木、建築用のブロック類、まくらぎなどの製品ではコンクリートを締固め成形後ただちに型わくを取りはずす即時脱型による製造方式が開発されており、このような場合には単位水量のきわめて少ないパサパサのいわゆる湿った土のような状態のコンクリートが使用されている。このような超かた練りコンクリートでは、成形の際の締固めが不十分であるとコンクリート中に空気を残したり、表面がポーラスになるおそれがあり、コンクリートの振動締固めによる品質の向上はきわめて重要な問題である。従来より、超かた練りコンクリートに関しては、いくつかの研究<sup>13)</sup>、<sup>135)</sup>～<sup>137)</sup>がなされているが、その振動締固めについて論じた報告はきわめて少ない。これは、製品工場での研究結果が公表されない点にも原因があると思われる。また、小規模の工場では、従来よりの経験によっている例もあり、超かた練りコンクリートについては、振動締固めはもとより、その適正配合や品質についても今後究明されなければならないと考える。

超かた練りコンクリートの締固めについては、土木用ブロックを対象とした阪本<sup>13)</sup>の研究があり、振動数3000～7000  $\text{vpm}$  の範囲内では、振動数、振幅、加速度などをますと強度や充填率が高くなると報告している。また、山本<sup>135)</sup>は超かた練りコンクリートの強度は空げき率ときわめて密接な関係があり、空げき率が1%ますと強度は約6%減少し、配合の改善には減水剤の使用を考慮すべきであると述べているが、その適正配合や締固め条件についてはさらに検討する必要があるし、成形の際の加圧の効果も明らかにされなければならない。さらに、即時脱型コンクリートの最適締固め条件についても研究しなければならない。

ここでは、単位セメント量、単位水量など配合をかえたコンクリートについて振動台による締固め条件、加圧の影響などについてまず即時脱型しない場合について基礎的な検討を行ない、<sup>138)</sup>さらに即時脱型型わくを用いて即時脱型用コンクリートの最適締固め条件について調べた。

### § 2. 超かた練りコンクリートの振動締固め条件

#### (1) 実験の概要

普通ポルトランドセメント（比重＝3.15、28日圧縮強度＝40.6  $\text{N/mm}^2$ ）を用い、粗骨材は吉野川産の川砂利と鳴門市大麻町産の碎石を20～10  $\text{mm}$ および10～5  $\text{mm}$ の2粒度区分にふるい分けて使用した。細骨材は吉野川産の川砂である。コンクリート用混和材料としては、フライアッシュ（比重＝2.16、）ブレン比表面積＝3370  $\text{cm}^2/\text{g}$ ）と製品用減水剤W（主成分はアルキルベンゼンスルホン塩）とを用いた。

使用したコンクリートの配合は、すべてゼロスランプの超かた練りとし、この中で単位水量の多いものを配合Ⅰ、単位水量の少ないほうを配合Ⅱとし、碎石コンクリートと砂利コンクリートとの締固め係数がほぼ同じ値（CF値＝0.77～0.78）になるよう単位水量をきめた。

単位セメント量は300  $\text{kg}$ の基準配合のほか、セメント量、水量、細骨材率などを変えた配合や混和材料を加えたものも選定した（表－1.7.1参照）。

表 - 1.7.1 実験に用いたコンクリートの配合

配合の種類	最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量				
						水 (Kg)	セメント (Kg)	細骨材 (Kg)	細骨材 (Kg)	混和材料
R-I(-300)	20	0	-	45	50	135	300	976	972	-
R-II(-300)	20	0	-	40	52	120	300	1,030	952	-
RF-II(-300)	20	0	-	37	50	110	240	997	992	フライアッシュ 60(Kg)
RW-II(-300)	20	0	4~6	32	47	96	300	941	1,057	減水剤 W 400(cc)
R-III-250	20	0	-	48	55	120	250	1,118	911	-
R-III-350	20	0	-	34	48	120	350	936	1,010	-
R-III-400	20	0	-	30	44	120	400	839	1,064	-
R-III-45	20	0	-	40	45	120	300	896	1,091	-
R-III-50	20	0	-	40	50	120	300	996	990	-
R-III-55	20	0	-	40	55	120	300	1,095	893	-
O-I(-300)	20	0	-	50	53	150	300	1,014	902	-
O-II(-300)	20	0	-	45	55	135	300	1,074	872	-
OF-II(-300)	20	0	-	42	53	125	240	1,036	912	フライアッシュ 60(Kg)
OW-II(-300)	20	0	4~6	36	50	108	300	985	978	減水剤 W 400(cc)
O-III-250	20	0	-	54	58	135	250	1,156	831	-
O-III-350	20	0	-	39	51	135	350	974	929	-
O-III-400	20	0	-	34	47	135	400	878	983	-
O-III-48	20	0	-	45	48	135	300	937	1,007	-
O-III-53	20	0	-	45	53	135	300	1,035	910	-
O-III-58	20	0	-	45	58	135	300	1,132	814	-
O-II 400-43	20	0	-	34	43	135	400	803	1,057	-
O-II 400-48	20	0	-	34	48	135	400	897	964	-
O-II 400-53	20	0	-	34	53	135	400	990	871	-

注) R : 川砂利 O : 碎石 F : フライアッシュ W : 減水剤

細骨材, 5 ~ 1.2 mm : 1.2 mm 以下 = 3.7 粗骨材, 20 ~ 10 mm : 10 ~ 5 mm = 6 : 4

容量 50 L の強制練りミキサを用いてモルタルで 1 分、粗骨材を投入して 1 分 30 秒練り混ぜたのち、 $\phi 10 \times 20$  cm の円柱形型わくに詰め、第 4 章で述べた低振動数用振動台と高振動数用振動台とで所定の振動締固めを行なった。締固め条件は、振動数と加速度の影響を検討する場合には、前者の振動台で 4000、5000 および 6000 vpm、後者の振動台では 7200 および 10800 vpm を用い、振動時間は型わくへの詰り具合より判断して配合 I で 30 秒、単位水量の少ない配合 II では 60 秒とした。つぎに、振動時間の影響を調べる場合には、5000 および 10800 vpm の振動数を用い、20 ~ 120 秒の範囲内で時間をかけて締固めを行なった。締固め条件と使用したコンクリートの配合を表 - 1.7.2 に示す。

表 - 1. 7. 2 振動締固め条件と用いたコンクリートの種類

(1) 振動数および加速度の影響を検討する場合

振 動 台	振 動 数 (vpm)	加 速 度 (g)*	振動時間 (sec)	コ ン ク リ ー ト の 配 合	
低振動数用 振 動 台	4,000	8.1	60 (30)**	R-I R-II, RF-II, RW-II,	O-I, O-II, OF-II, OW-II
	5,000	11.7	60 (30)	R-I R-II, RF-II, RW-II, R-II-250, 300, 350, 400, R-II-45, 50, 55,	O-I, O-II, OF-II, OW-II O-II-250, 300, 350, 400 O-II 400-43, 48, 53
	6,000	16.4	60 (30)	R-I, R-II, RF-II, RW-II,	O-I, O-II, OF-II, OW-II
高振動数用 振 動 台	7,200	8.3	60 (30)	R-I, R-II, RF-II, RW-II,	O-I, O-II, OF-II, OW-II
	10,800	18.0	60 (30)	R-I, R-II, RF-II, RW-II, R-II-250, 300, 350, 400	O-I, O-II, OF-II, OW-II O-II-250, 300, 350, 400

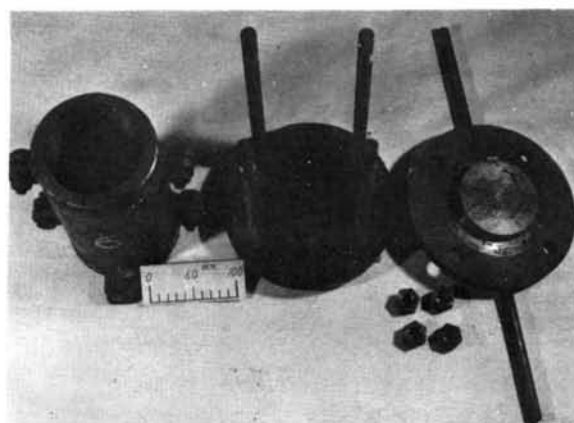
(2) 振動時間の影響を検討する場合

振 動 数	振 動 数 (vpm)	加 速 度* (g)	振 動 時 間 (sec)	コ ン ク リ ー ト の 配 合
低振動数用	5,000	11.7	20, 30, 60, 90, 120	R-II, RW-II
高振動数用	10,800	18.0	30, 60, 90, 120	O-II, OW-II

注) \*振動台の型わく取り付け位置での加速度 \*\*配合I (R-I, O-I)は振動時間を30秒とした。

超かた練りコンクリートでは、十分に締固めを行なつてもコンクリート中に空けきがあるの  
で加圧成形がきわめて効果的であると考えられるので、写真-1.7.1に示すような加圧成形型わ  
くを用いて、加圧成形の効果も調べた。まず、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の寸法の円柱形型わくにコンク

写真 - 1. 7. 1 加圧成形型わく





リートを詰め、振動台を用いて5000 vpm あるいは10800 vpm で60秒間締固めを行なったのち、外圧用型わくに取り付け、100 t 万能試験機を用いて15 ㎏の加圧力で3分間加圧し、小型のトルクレンチを用いて一定のトルクでボルトを締め圧力を保持した。加圧の影響は、R-II、RW-II、O-II-250、O-II-300、O-II-350、O-II-400、OW-IIなどの配合のコンクリートについて調べた。

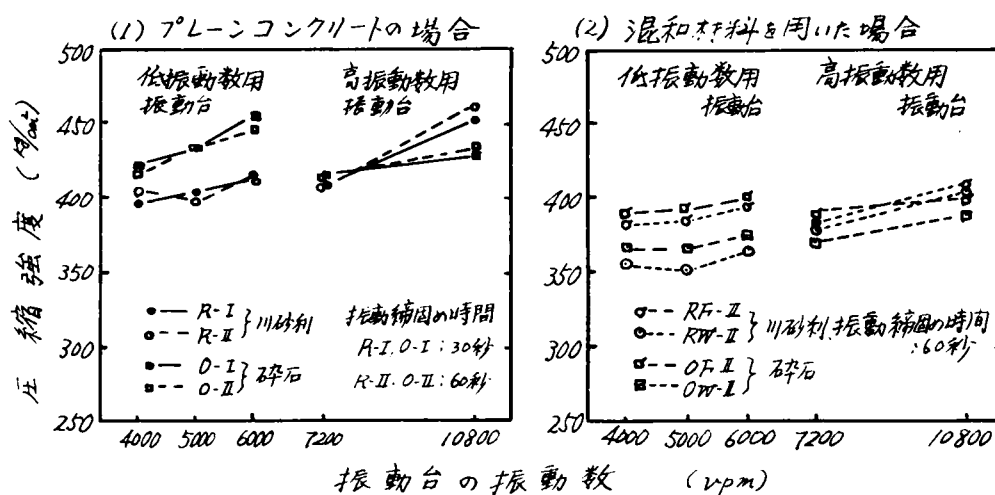
加圧を行なわないコンクリートは、数時間後表面仕上げを行ない、翌日脱型し以後20℃の水中で養生した。加圧成形をしたものは20時間圧力保持を行なったのち表面を仕上げ、その翌日脱型し養生した。すべての供試体は、材令28日で動弾性係数を求め圧縮強度試験を実施した。

## (2) 実験結果の考察

### 1) 振動数と加速度の影響について

川砂利と碎石を用いた超かた練りコンクリートについて振動台の振動数と圧縮強度との関係を示した図-1.7.1にみられるように、同一種類の振動台では振動数を大きくしたほうが締固め効果はよくなる傾向がある。振動台の最適振動数については、すでに指摘したように高

図-1.7.1 振動台の振動数と圧縮強度との関係

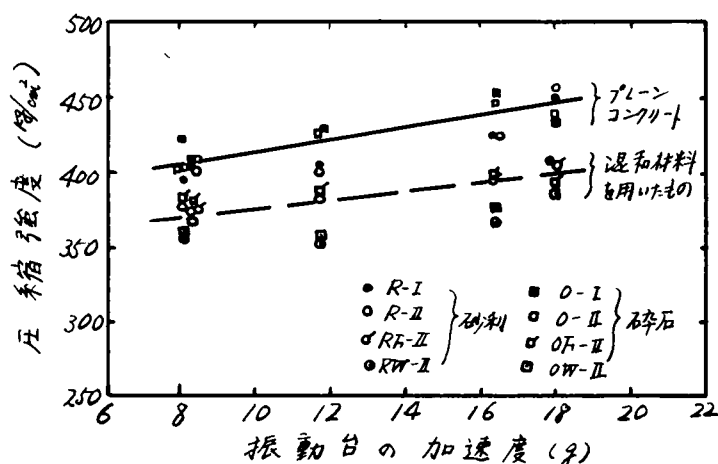


振動数がよいという報告と<sup>9)10)</sup>6000 vpm までの低振動数を推奨している報告とがあり、スランプ数センチメートルのコンクリートを用いその圧縮強度で検討した結果では、第4章第4節に述べたように7200 vpm と10800 vpm とでは大差なく、流動性のよいコンクリートでは低振動数の6000 vpm がややよい傾向にあつた。しかし、本実験に用いた超かた練りコンクリートでは、図-1.7.1のように、同じ種類の振動台であれば振動数が高いほど締固め効果がよく、全体としてみると碎石コンクリートでは低振動数用振動台の6000 vpm、川砂利コンクリートでは高振動数の10800 vpm で締め固めたとき強度が最高で、もっともよい締固め効果を示す傾向があり、骨材の形状によっても多少締固め条件のことなることを示している。

低振動数用振動台では振幅を大きく、逆に高振動数用振動台では振幅を小さくしているので、振動台の加速度も締固めの一つの基準として考慮する必要がある。2種の振動台の型わく取付け位置で加速度を実測したので、この値と圧縮強度との関係を示すと図-1.7.2のよう

になり、ばらつきは多少あるが、加速度も締固め効果と密接な関係のあることを示している。Meissner<sup>55)</sup>は加速度が締固めの重要な因子であると述べているが、超かた練りコンクリー

図 - 1.7.2 振動台の加速度と圧縮強度との関係



トでは加速度を大きくして締固めたほうが有利である。

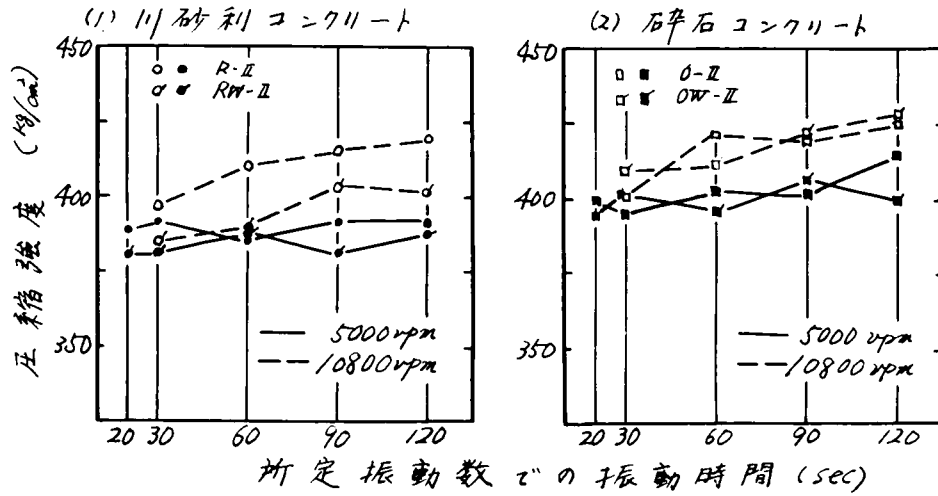
碎石はその骨材粒子が角ばっているので移動する場合の内部抵抗力が川砂利より大きく可動性が劣るので、加速度が同程度なら大きい振幅で締め固めたほうが骨材のかみ合せと組織の安定化いわゆる緊密化が進みやすいものと思われ、実際の製品にはきわめて振幅の大きいシ ャック式の締固め方法も採用されている。

なお、締固めがよく強度の高いコンクリートほどその単位重量が大となる傾向がみられ、動弾性係数も強度とともに増加している。したがって、配合が同じであれば、単位重量や動弾性係数によっても締固め効果の判定がある程度可能になると考えられる。

## 2) 振動締固め時間の影響について

振動台による振動締固めは、振動エネルギーが型わく面よりコンクリートへ伝わり、とくに底面より上方へ伝達されるしくみと考えられ、その締固め過程はすでに述べたように、①構成粒子の移動と沈下、②粒子の再配列と空げきの排除 ③粒子のかみ合せと組織の安定化、④材料の分離の4段階にわけて考えた場合、単位水量の少ないパサパサ状態のコンクリートはワーカブルなコンクリートに比べて各段階の持続時間がかなり長くなり、図-1.7.3に示したように振動締固め時間を長くしたほうが超かた練りコンクリートの圧縮強度は高くなる傾向がある。川砂利を用いたコンクリートを振動数5000 vpmで締め固めた場合、振動時間による強度の伸びが少ないのは、コンクリートの不安定な回転の影響ではないかと思われる。プレーンコンクリートでは、締固め時間を60秒以上にしても強度の伸びが比較的少ないことや工場での生産性を考慮すると、振動台の性能にもよるが振動時間は6.0秒程度が適当ではないかと思われる。

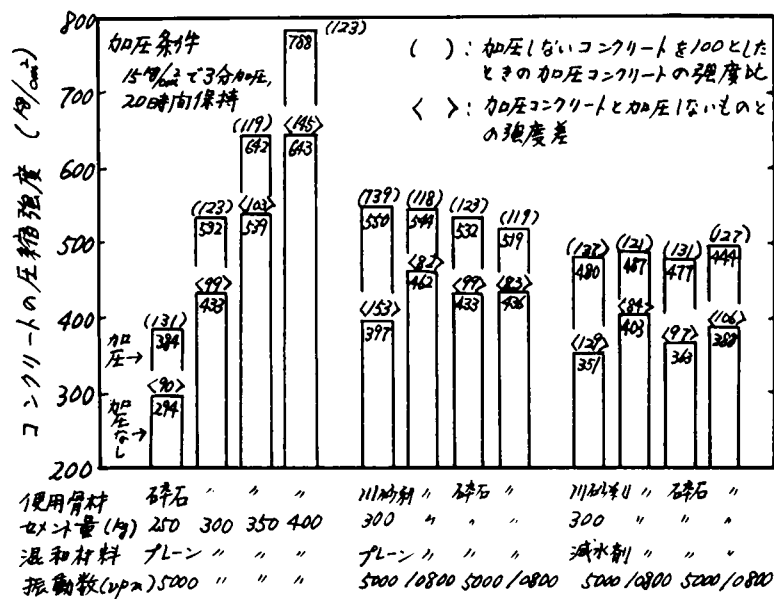
図 - 1. 7. 3 振動締固め時間と圧縮強度



### 3) 加圧の影響について

加圧成形はまだ固まらないコンクリートに圧力を加え、空気を減少し余分の水をしぼり出して強度増進をはかるもので、吉田博士の研究をもとに日本プレスコンクリート工業KK<sup>139)</sup>によってすでに工業化されているが、空気の残りやすい超かた練りコンクリートではとくに効果的であると思われ、加圧成形の効果について検討を行なった。すなわち、加圧力15%、加圧時間3分、圧力保持20時間の条件で、配合や締固め条件をかえて成形したのち、材令28日で圧縮強度試験を行ない、加圧しない普通コンクリートの値と比較した結果を図-1.7.4に示す。配合や締固め条件によって加圧の効果はことなるが、加圧によって20~30%、平均26%の強度増加を示している。

図 - 1. 7. 4 超かた練りコンクリートの圧縮強度におよぼす加圧の影響



富配合コンクリートほど加圧による強度増加の絶対値は大きい、強度の増加率は大差がない。加圧のまえに高振動数の10800 vpm で締め固めた場合のほうが5000 vpm に比べて加圧による強度増加が小となっている。また、骨材の形状については、川砂利コンクリートのほうが碎石コンクリートより加圧による強度の増加がいくぶん大きい、丸味をもった川砂利のほうが圧力の伝達が多少よくなるためと思われる。なお、減水剤を用いたものはプレーンコンクリートより加圧の効果がいくぶん大きくなる傾向にあるが、これは界面活性作用によりセメントペーストの流動性がよくなるためと考えられる。

#### 4) 超かた練りコンクリートの配合と圧縮強度

セメント量を一定とし、単位水量を15 Kgかえた配合Ⅰと配合Ⅱの平均強度を示すと表-1.7.3のように碎石および川砂利コンクリートとも強度差はほとんど認められない。これは山本らも指摘しているように、同一セメント量では水量が多くなるとペースト量が多くなり、

表 - 1.7.3 単位セメント量一定で単位水量をかえたコンクリートの圧縮強度

川 砂 利 コ ン ク リ ー ト						碎 石 コ ン ク リ ー ト					
配合%	セメント量 (Kg)	水 量 (Kg)	W/C (%)	単位重量 (Kg/m³)	圧縮強度 (kg/cm²)	配合%	セメント量 (Kg)	水 量 (Kg)	W/C (%)	単位重量 (Kg/m³)	圧縮強度 (kg/cm²)
R-I	300	135	45	2,394	417	O-I	300	150	50	2,378	431
R-II	300	120	40	2,388	419	O-II	300	135	45	2,360	427

注) 5種の振動数締め固め条件によつてえられた値の平均値

しかもその流動性がよくなるので、それだけ空けきが満されやすくなるためと考えられ、コンクリートの単位重量は配合Ⅰのほうが大となっている。

図 - 1.7.5 単位セメント量と圧縮強度

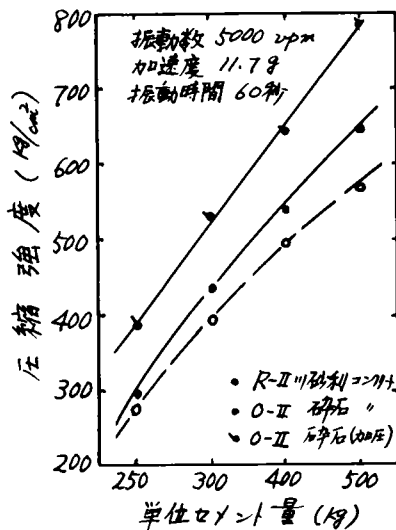
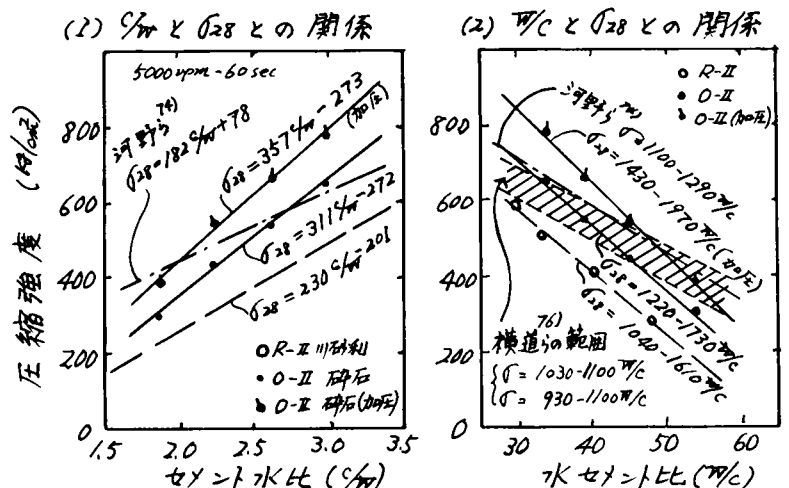


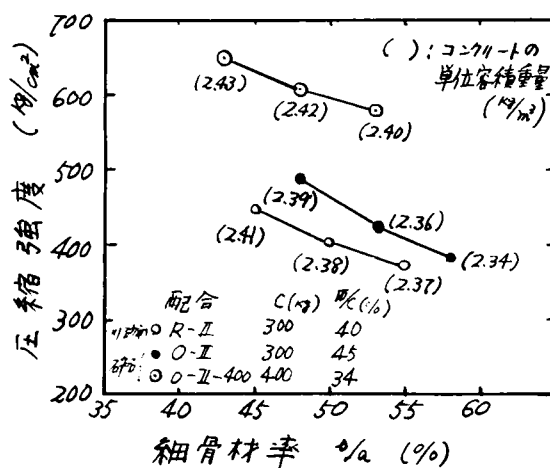
図 - 1.7.6 超かた練りコンクリートのセメント水比あるいは水セメント比と圧縮強度との関係



つぎに、単位水量を一定とし、単位セメント量をかえた場合、図-1.7.5のように5000 vpm、10800 vpmで締め固めた場合とも明らかに強度はセメント量とともに増加する。したがって、この結果を利用してセメント水比と圧縮強度との関係を求める、図-1.7.6(1)に示したように1次式となり、超かた練りコンクリートでも十分な締固めを行えばセメント水比説を適用することが可能である。また、かた練りでしかも水セメント比の範囲が狭いので、水セメント比と圧縮強度との関係を求めると、実用的にはこの関係も直線式で示すことができる。既往の研究結果<sup>74)~76)</sup>より直線の勾配が大きいのは、超かた練りコンクリートは単位セメント量の変化に敏感なためと思われる。なお、同一水セメント比<sup>140)</sup>では、砂利コンクリートより碎石コンクリートの強度が明らかに大であり、Erntroyらの指摘しているようにかた練りには碎石の使用が有利である。

超かた練りコンクリートでは細骨材率のとり方が一つの問題点とされており、ブロックなどの配合では強度が最大になる細骨材率の存在することが報告されている。<sup>136)</sup>強度面より考えると、図-1.7.7のように細骨材率をある程度小さくしたほうが有利であり、コンクリートの単位重量も大となっている。

図-1.7.7 細骨材率とコンクリートの圧縮強度



なお、最適細骨材率については、はだ面なども考慮してさらに検討する必要がある、即時脱型用コンクリートの配合については第2編で検討を行なった。

##### 5) 脱型後のコンクリートのはだ面について

コンクリート製品においては、そのはだ面は強度と同様に重要視される傾向がある。Kolek<sup>34)</sup>は、締固めの一つの目的は表面の気泡を除き外観をよくすることであると述べている。とくに、パサパサ状態の超かた練りコンクリートでは、一般に、はだ面が劣り問題になるので、配合や締固め条件がはだ面におよぼす影響について調査した。これらの一例を写真-1.7.2(1)~(4)に示す。

碎石コンクリートと川砂利コンクリートとははだ面では差はほとんど認められず、それぞれ単位水量の多い配合Ⅰのほうがやや良好である。減水剤Wを用いたものは、全般的にきれいな面になるが大きい気泡がところどころに残る傾向がある。フライアッシュを用いたものはブレンコンクリートとほとんど変わらず、はだ面を改善するには外割で加えると効果的であると考えられる。加圧を行なうとはだ面の改善にきわめて有効である(写真-1.7.2(1))

参照)。写真-1.7.2(2)、(3)にみられるように富配合になるほど、あるいは振動時間が長くなるほどはだ面は明らかによくなる。また、同じ特性の振動台では振動数が高くなるほどはだ面はよくなる傾向がある。なお、細骨材率を大きくすると強度面では多少不利になる傾向がみられたが、はだ面に関してはいくぶんよくなる傾向がみられている(写真-1.7.2(4)参照)。

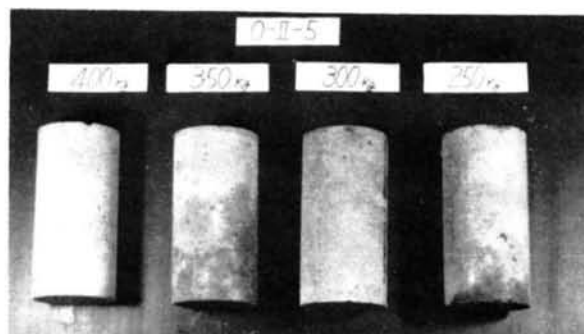
写真-1.7.2 脱型したコンクリートのはだ面の一例

(1) コンクリートの種類と加圧の影響

(川砂利コンクリート、配合Ⅱ、5000 vpm)

(2) 単位セメント量の影響

(碎石コンクリート、配合Ⅱ、5000 vpm)

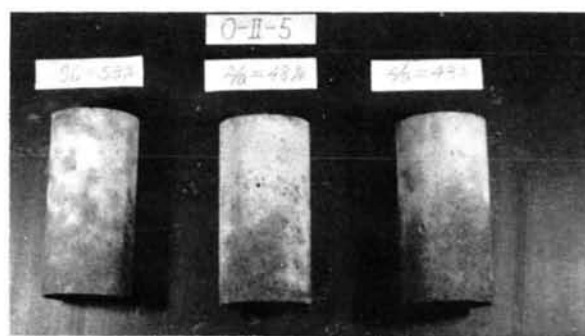
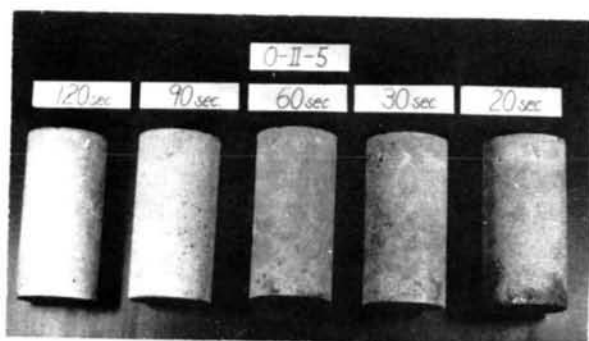


(3) 振動時間の影響

(碎石コンクリート、配合Ⅱ、5000 vpm)

(4) 細骨材率の影響

(碎石コンクリート、配合Ⅱ、5000 vpm)



なお、超かた練りコンクリートに対する混和材料の影響については、第2編に述べる。

### § 3. 即時脱型を行なうコンクリートの振動締固め条件

(1) 実験の概要

超かた練りコンクリートは、通常、即時脱型製品に用いられるので、コンクリートは供試体の即時脱型できる型わくを使用し、即時脱型を行なうコンクリートに対する振動締固め条件の影響について検討を行なった。

# 1) 使用材料とコンクリートの配合

普通ポルトランドセメント（比重＝3.15、28日圧縮強さ＝41.3 $\text{MPa}$ ）を用い、粗骨材は最大寸法20mmの吉野川砂利（比重＝2.60、吸水量＝1.32%）、細骨材は吉野川産の川砂（比重＝2.62、吸水量＝1.28%、粗粒率＝2.79）をそれぞれ20～10、10～5mmと5～2.5、2.5mm以下の2粒度区分にふるい分け粒度調整して使用した。なお、混和剤としては充てん率をあげるため超かた練りのブロック用減水剤のルブリリスLを用いた。

コンクリートの配合は、表－1.7.4に示すように単位セメント量320Kgで単位水量をかえたブレンコンクリートと混和剤を用いた場合は単位セメント量を30Kg（約10%）減じ単位セメント量290Kgの配合を主として用い、ブレンと同セメント量の配合も使用した。

表－1.7.4 実験に用いた即時脱型用コンクリートの配合

コンクリートの種類	配合No.	粗骨材最大寸法(mm)	スランブ(cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (Kg/m <sup>3</sup> )				単位混和材量 (CC)	実測CF値
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
ブレン	No. 1	20	0	32.8	4.3	105	320	860	1151	－	0.74
	No. 2	20	0	35.0	4.3	112	320	852	1141	－	0.75
	No. 3	20	0	37.5	4.3	120	320	844	1128	－	0.76
混和剤を用いたもの	No. 4	20	0	34.1	4.3	99	290	879	1174	725	0.75
	No. 5	20	0	35.2	4.3	102	290	876	1169	725	0.76
	No. 6	20	0	36.2	4.3	105	290	872	1165	725	0.77
	No. 7	20	0	38.6	4.3	112	290	864	1154	725	0.78
	No. 8	20	0	33.1	4.0	106	320	800	1209	800	0.75

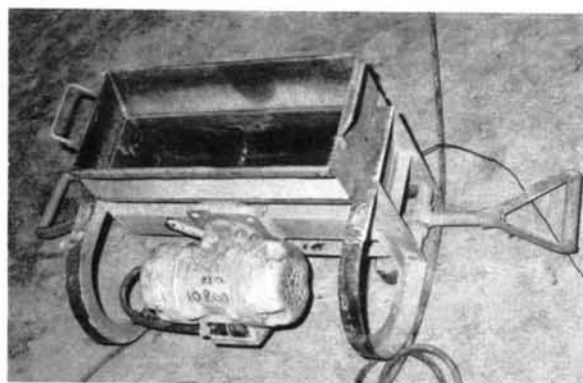
注) 成形温度 27～29℃の配合

# 2) 即時脱型用コンクリート供試体の作成

即時脱型には、口15×15×54cmのコンクリートはり供試体の作成できる写真－2.7.3に示す即時脱型型わく（日本ワッカーKK製）を用いた。

すなわち、強制練りミキサを用いてモルタルで1分、さらに川砂利を投入して1分30秒練り混ぜたパサパサ状態のコンクリートを、ガイドを取り付けた即時脱型型わくに1層に盛り

写真－1.7.3 コンクリートの即時脱型用型わく



込み、型わくに取り付けた高振動数バイブレーターを作動しながら写真-1.7.4のように所定時間締固めを行なったのち、上面を平らに仕上げて木製の厚板(18mm厚)をのせ、この当て板が底板になるよう型わくを反転し、左右のハンドルを持ちあげて型わくを上方に抜いて即時脱型を行なった(写真-1.7.5参照)。

写真-1.7.4 コンクリートの締固め成形

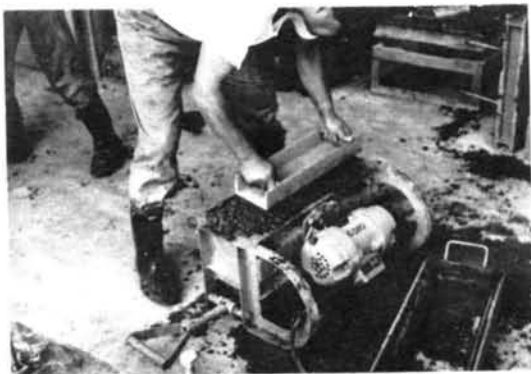


写真-1.7.5 コンクリートはり供試体の即時脱型



### 3) 即時脱型用コンクリートの振動締固め条件

即時脱型を行なうコンクリートの締固め条件は、型わくに取りつける2種のバイブレーター-(ARFM 08/42型、08/4/42型)と2種のコンバーター-(FU 5Z/42/150型、5z/42/200型)との組み合わせによって4種の振動数(5400、7200、10800および14400vpm)をえることができるが、本実験では、表-1.7.5に示したように、まず振動数の影響を検討する場合には、振動締固め時間をやや長目の90秒の一定とし、振動数を5400、7200および10800vpmの3種にかえて実験し、つぎに振動時間の影響を調べる場合には振動数を7200と10800vpmとし、締固め時間を30、60、90および120秒にかえて検討を行なった。

表-1.7.5 即時脱型を行なうコンクリートの締固め条件

実験シリーズ	振動数(vpm)	振動時間(sec)	使用コンクリートの配合
振動数の影響	* 5400(8)、7200(12)、10800(15)	90	№.1、№.2、№.3、 №.4、№.6、№.7、№.8
振動時間の影響	7200(12)、10800(15)	30、60、90、120	№.2、№.5

\* ( )内の値：即時脱型型わく4点で実測した振動加速度の平均値

### 4) 圧縮強度試験

即時脱型を行なった供試体はそのまま20℃の恒温室(RH=75~85%)に1日放置し、翌日20℃±1degの水そうに入れ、材令28日まで標準養生を行なった。所定材令になった供試体は水切り後、コンクリートカッターを用いて長さ18cmに切断し3個の供試体を作成し、15×15cmの加圧板をのせて圧縮強度試験を行なった。

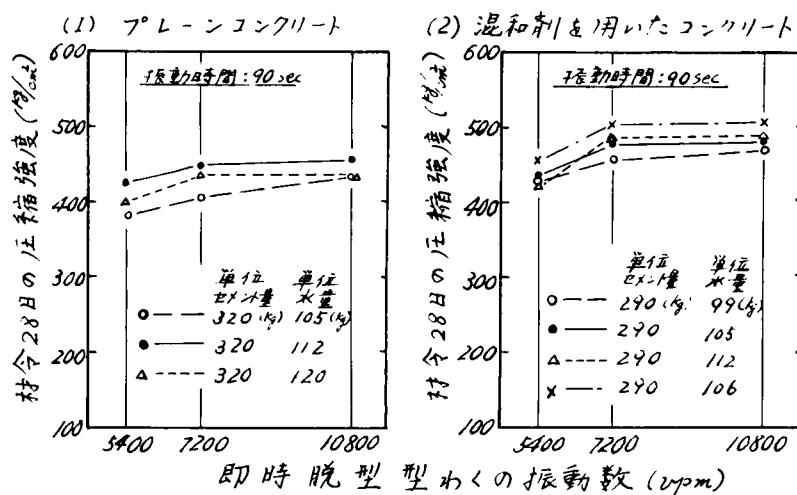


## (2) 実験結果とその考察

### 1) 振動数の影響について

即時脱型型わくの振動数と圧縮強度との関係を示した図 - 1. 7. 8 にみられるように、振動数は低目の 5 4 0 0 vpm より 7 2 0 0 あるいは 1 0 8 0 0 vpm と高くしたほうが強度は大となる傾向がある。振動数 7 2 0 0 と 1 0 8 0 0 vpm とでは単位水量のもっとも少ないコンクリートをのぞくと 締固め効果の差はほとんどみられないが、これは型わくの平均加速度に大差がないのも一つの理由と考えられる。

図 - 1. 7. 8 振動数と即時脱型を行なったコンクリートの圧縮強度



つぎに、超かた練り用の混和剤を加えたコンクリートではセメント量を約 10 % 節約したにもかかわらず強度はプレーンコンクリートより高くなる傾向があり、同一セメント量では明らかに高い強度がえられ、はだ面もよくなっている。これは、コンクリートの充てん率がよくなるためと思われる。なお、この減水剤を用いると同一 C F 値をえるのに超かた練りの場合でも、8 ~ 10 Kg の減水が可能である (表 - 1. 7. 4 参照)。

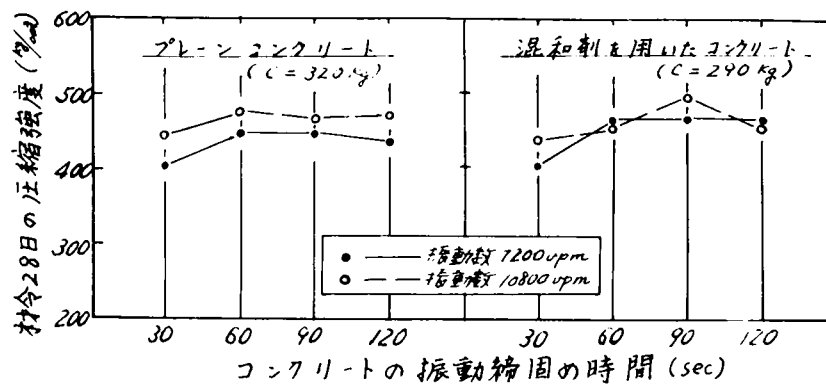
また、同一セメント量で単位水量をかえると、水量が最小で水セメント比がもっとも小さいものが強度は最大となるとはかぎらず、水量がいくぶん多目のほうがセメントペーストの流動性がよくなるため充てん率が上って強度は高くなる傾向がえられている。

### 2) 振動締固め時間の影響について

振動締固め時間と圧縮強度との関係を示した図 - 1. 7. 9 にみられるように、振動時間を 30 秒から 60 秒にすると明らかに強度は高くなるが、この値以上に長くしても増進率が小であり、強力な締固めを行なえば即時脱型を行なうコンクリートでも 60 秒程度が適当と考えられる。また、振動時間が長くなって 120 秒になると型わく中でコンクリートが移動し、配合や振動数によってことなるが、粗骨材が型わくの端部に多少集まる状態も観察され、120 秒では 60 秒や 90 秒の場合に比べて強度が同程度か、やや下がる傾向のものもある。なお、混和剤を用いたコンクリートはセメント量を 30 Kg 節約したが、プレーンコンクリートと大差なく、振動時間 90 秒では強度は高くなる傾向がある。

また振動数 7 2 0 0 vpm より 1 0 8 0 0 vpm がやや高い強度がえられているが、加速度や振幅の影響も含めて高振動数締固めの効果については、さらに検討する必要があると思われる。

図 - 1. 7. 9 振動締固め時間と即時脱型を行なったコンクリートの圧縮強度



結局、超かた練りコンクリートを用いて即時脱型を行なう場合、同じ特性の振動機であれば、その振動数は高目のほうが締固め効果はよくなる傾向があり、振動時間は60秒前後が適当であると考えられる。

#### § 4. 結 語

碎石および川砂利を用いた超かた練りコンクリートを2種の振動台で締固め成形し、圧縮強度におよぼす振動数、加速度などの締固め条件や単位セメント量、水セメント比などの配合の影響について検討し、さらに川砂利コンクリートを即時脱型する場合の締固め条件について調べた本章の結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 同じ特性の振動台であれば、超かた練りコンクリートは高い振動数で締め固めたほうが強度は高くなり、また振動加速度を大きくしたほうが締固め効果はよくなる。
- (2) 骨材の形状によって超かた練りコンクリートの最適締固め条件は多少ことなり、碎石コンクリートは低振動数用振動台で6000 vpm、川砂利コンクリートは高振動数用振動台で10800 vpmで締め固めたものが強度は高くなる傾向がある。
- (3) 超かた練りコンクリートでは振動締固め時間を長くするにつれて、強度は大となる傾向がみられるが、その強度増加率よりみて締固め時間は60秒前後が適当である。
- (4) 使用骨材、配合、締固め条件などによってことなるが、加圧力15%で3分間、圧力保持20時間の条件で加圧成形したコンクリートの材令28日の強度は加圧しないものに比べて20～30%、平均で26%増加する。
- (5) 超かた練りコンクリートの強度増加にはセメントの増量が効果的で、セメントを50 Kg/m³ますと28日強度はおおよそ100%高くなる。また、単位水量が一定なら、セメント水比と圧縮強度との関係を、一般の構造用あるいは製品用コンクリートの場合と同様に1次式で示すことができる。
- (6) コンクリートのはだ面は加圧コンクリートがもっともよく、セメント量の多いほど、振動数の高いほど、振動時間の長いほど、減水剤を用いたものほどよくなる傾向がみられる。
- (7) 即時脱型型わくを用い、成形後直ちに脱型を行なう場合の振動締固め条件は、振動数は5400 vpmの低目より7200 vpmから10800 vpmの高目で、振動締固め時間は60秒程度が適当であり、その条件は即時脱型を行なわない場合と大差がない。

## 第8章 配合とワーカビリティおよびコンシステンシー

### § 1. 緒 言

一般に、まだ固まらないコンクリートは取扱いによって材料の分離することが少なく、比較的容易に運搬でき、打込みの際には型わくのすみずみまで行きわたり、締固めや仕上げが容易で作業が順調に進められるような軟度と組成をもったもの、いわゆるワーカビリティのよいコンクリートが望まれる。土木学会のコンクリート標準示方書（以下示方書という）でも、コンクリートの配合は、作業に適するワーカビリティをもたねばならないことを規定している。<sup>141)</sup>

まだ固まらないプラスチックな状態のコンクリートは流動性があり、その性質を表わすのにワーカビリティ、コンシステンシー、プラスチシティ、フィニッシュビリティなどの用語が用いられ、つぎのように定義されている。

ワーカビリティ : コンシステンシーによる打込みやすさの程度および材料の分離に抵抗する程度を示すまだ固まらないコンクリートの性質。

コンシステンシー : 主として水量の多少によるやわらかさの程度で示されるまだ固まらないコンクリートの性質。

プラスチシティ : 容易に型に詰めることができ、型をとりさるとゆっくり形を変えるが、くずれたり材料が分離したりすることのないようなまだ固まらないコンクリートの性質。

フィニッシュビリティ : 粗骨材の最大寸法、細骨材率、細骨材の粒度、コンシステンシーなどによる仕上げやすさの程度を示すまだ固まらないコンクリートの性質。

これらのまだ固まらないコンクリートの性質は相互に関係があり、作業性や材料の分離に抵抗する程度を意味するワーカビリティが代表として用いられ、もっとも重要であるが、一般には、コンクリートのやわらかさを示すコンシステンシーや成形の容易さ、変形抵抗などを示すプラスチシティもワーカビリティの中に含めて考えられる場合が多い。しかし、厳密には A E コンクリートとプレーストコンクリートあるいはセメント量のことなるコンクリートにみられるように、コンシステンシーが同じでも、ワーカビリティの相違する場合のあることも十分に考慮しておかなければならない。Powers<sup>142)</sup> はコンシステンシー、ワーカビリティなどの流動性を表わす言葉にはいろいろな意味が含まれるので量的に定義することは困難であり、ワーカビリティの良否の判断は施工される構造物やその状況におけるコンクリートの状態によってことなることを指摘している。たとえば、コンクリート製品では、振動機により強力な締固めを行なうものが多いので、一般の構造用としてはワーカビリティの劣ると考えられるかた練りコンクリートが適しており、逆に軟練りだと分離を生じ、ワーカビリティはよくないということになる。

ワーカビリティ、コンシステンシーなどの試験方法としては、スランプ試験、V B 試験、締固め係数試験、リモールチング試験、貫入試験など従来より多くの方法が提案され実用されている。<sup>143)~146)</sup> これらの試験方法は一長一短があり、一般の構造用コンクリートでは手軽に行なえるスランプ試験が広く使用されている。しかし、製品用コンクリートは振動機による締固めが行なわれるので、コンシステンシーや施工方法も考慮した最適の方法を用いるのが望ましく、ワーカビリティの試験方法については、今後さらに調査研究を進める必要がある。

つぎに、コンクリートのワーカビリティ、コンシステンシーなどは、セメントの品質、粗骨材の粒度と粒形、細骨材率、粗骨材の最大寸法、混和材料の品質と使用量、コンクリートの配合とくに水量、温度など種種の要因によって影響されるが、かた練りコンクリートに対する単位水

量、単位セメント量、細骨材率、粒形などの影響についてはまだ十分明らかにされていない。

また、ゼロスランプの超かた練りコンクリートはワーカビリティが劣り、コンシステンシーの判定もかなり困難であるが、何らかの方法によって測定を行なわなければならない。

本章では、まずコンクリートのワーカビリティ、コンシステンシーなどの試験方法について論じたのち、単位水量、単位セメント量、混和剤の有無、細骨材率、実積率などの諸要因の影響を調べ、振動締め成形を行なうようなかた練りコンクリートに適した試験方法を検討し、最後にかた練りコンクリートの配合を修正する場合の参考表を提案した。

## § 2. ワーカビリティ・コンシステンシーの試験方法

まだ固まらないコンクリートの性質の中では、作業性や材料の分離に抵抗する程度を示すワーカビリティがもっとも重要であるが、ワーカビリティを測定する最良の方法はまだなく、一般に用いられているスランプ試験、V B 試験、その他の方法はコンクリートのやわらかさすなわちコンシステンシーの試験方法である。しかし、コンシステンシーはワーカビリティと密接な関係があり、これらの試験値によってワーカビリティの判断がある程度可能であり、コンシステンシーの試験を広い意味でワーカビリティの試験として取り扱っている場合も多い。<sup>143), 146)</sup>これらの試験方法のうち主なものについて特徴を述べるとつぎのとおりである。

### (1) スランプ試験

J I S A 1 1 0 1 “コンクリートのスランプ試験方法”に規定されている方法で、<sup>147)</sup>円錐形のスランプコーンにコンクリートを詰め、垂直に持ちあげ、頂面の下がり方を測定する方法で、このスランプ値はコンクリート中の水量ときわめて密接な関係があり、コンシステンシーの値を示すといわれている。自重によってコンクリートが変形しようとする力と変形に対する抵抗力との約合ったとき静止する。

なお、スランプ試験を終えたコンクリートの側面を突き棒で軽くたたくことによってくずれが、そのくずれ方によってワーカビリティ、プラスチックチーなどの判断も可能である。このスランプ試験は再現性がやや悪く、個人差も生じやすいが、装置および測定がきわめて簡単であるという長所がある。<sup>142)</sup>Powers は、スランプ試験はスランプ値が 2.5 cm 以上のコンクリートに対してはよい指標であると述べている。

### (2) V B 試験

写真 - 1. 8. 1 に示す試験装置で、Vee-Bee コンシストメーターとも呼ばれ、かた練りコンクリートに適していると報告されている。<sup>148) 149)</sup>スランプ試験と同様にコーンに詰めてスランプさせ、頂面にプラスチックの透明円板をのせ、振動台の振動を開始し、振動によってコンクリートが締め固められ、モルタルが円板の下面全体に接するまでに要した時間を測定し、これを V B 値と称する。この方法は、振動台を用いて成形するコンクリートに適していると考えられ、V B 値が小さいとコンクリートがワーカブルで締め固めやすいことを示している。

なお、V B 装置の寸法を改良した形のものに振動台式コンシステンシー試験装置があり、かた練りの舗装コンクリートに実用されている。この場合、測定値は沈下度と呼んでいる。

写真 - 1. 8. 1 V B 試験装置



写真 - 1. 8. 2 締固め係数試験装置



### (3) 締固め係数試験

C F 試験とも呼ばれ、英国の B S 1 8 8 1 に規定されている方法で、試験装置は写真 - 1. 8. 2 のように、コンクリートを 2 個のホッパーを通して最下部の円筒形容器内に落下させ、その重量をはかり、これを理論値あるいは完全に締固めを行なった場合の重量との比で示し、締固め係数とする。<sup>150)</sup>

$$\text{締固め係数 (C F 値)} = \frac{\text{落下直後のコンクリートの重量 (kg)}}{\text{完全に締め固めたあとのコンクリートの重量 (kg)}}$$

理論値よりも完全に締め固めたあとの重量を用いるのがよいとされている。<sup>145)</sup> 打込み方法とことになっている欠点はあるがスランブの非常に小さいコンクリートの締固めやすさの程度を測定することができる。<sup>146)</sup>

### (4) リモールジング試験

基本的装置は Powers<sup>145)</sup> の考案したもので、標準スランブコーンでスランブを測定したのち、フローテーブルを回転してコンクリートが容器の中を移動し、同じ高さになる落下回数をはかる方法で、これをリモールジング数と呼ぶ、コンクリートの流動性が加味される有益な方法である。

振動締固めの場合には状況がことなるので、Wuerpel<sup>151)</sup> は落下装置のかわりに振動台に取り付ける方法を提案している。

### (5) フロー試験

A S T M C 1 2 4 に規定されている標準試験で上下振動を与えコンクリートの広がりを目視で測定する。<sup>143)</sup> とくに、プラスチックと付着力が小さいと分離を生じやすい。

### (6) 貫入試験

Kelley のボール貫入試験<sup>143)</sup> (A S T M C - 3 6 0)、D I N 1 0 4 8 に規定されているかた練り用の貫入試験<sup>143)</sup>、Iribarren の試験<sup>146)</sup> などがあり、いずれもその貫入量によってコンシステンシーを求めるもので、スラブ、舗装版などに適している。

以上のようにワーカビリティ・コンシステンシーを測定するには種種の方法があり、それぞ

れ特徴がある。かた練りコンクリートの場合、Cusens<sup>148)</sup>はV B試験を推奨し、Plowman<sup>48)</sup>もワーカビリチーのよいコンクリートは振動時間が短くなるのでV B値でワーカビリチーの判定ができるとのべている。一方Granville<sup>152)</sup>は、締固め係数が小さいと、締固めを行なうための仕事量が大きくなるので、C F値によって締固めやすさの程度を表わすことができると述べている。また、ACI Committee 211<sup>149)</sup>では、V B試験、C F試験について検討し、かた練りはV B試験が適当であり、C F試験はややかた練りに対して有効で、ごくかた練りコンクリートに対してはV B試験ほど鋭敏ではないと述べている。

わが国では製品用のかた練りコンクリートのワーカビリチー・コンシステンシーの測定方法について十分に検討されていないので、本章ではコンクリートの配合(単位水量、単位セメント量、細骨材率、粗骨材粒度、A E剤など)をかえて、スランプ試験、V B試験、C F試験などを実施し、かた練りコンクリートに適した方法について考察した。

### § 3. ワーカビリチー・コンシステンシーにおよぼす諸要因の影響

#### (1) まえがき

コンクリートのワーカビリチー・コンシステンシーは単位水量、単位セメント量、粗細骨材の粒度と粒形、細骨材率、混和材料、温度など種類の要因によつて影響される。

まず、単位水量はコンクリートのコンシステンシーときわめて密接な関係があり、一般の構造物に用いられるコンクリートでは、スランプを1 cm増減するのに単位水量を1.2%増減すればよいことになっている。<sup>153)</sup><sup>154)</sup> 単位水量を多くするとコンクリートはやわらかくなって施工が容易になるが、あまり多すぎると粗骨材とモルタルとの分離が顕著になり、逆にワーカビリチーは悪くなる。また、単位セメント量が少ないとプラスチック、フィニッシュビリチーが劣り、ワーカビリチーもよくないが、反対に多すぎると粘稠性をましワーカブルでなくなりしかも不経済なコンクリートとなる。

A E剤、減水剤などの化学的混和剤の使用はコンクリートのワーカビリチーの改善にきわめて有効で、<sup>155)</sup> プラスチックで材料分離を生じにくいコンクリートがえられる。また、良質のフライアッシュの使用も効果的とされている。<sup>156)</sup><sup>157)</sup>

骨材については、碎石を用いた場合、角ばりがあるので川砂利コンクリートよりワーカビリチーが劣り、同一コンシステンシーをえるに要する単位水量は、柳田の報告によると川砂利より6~11% (15~20 Kg/m<sup>3</sup>) ます必要がある。伊東らは、V B値が最小になる最適細骨材率が存在し、この値は碎石コンクリートでは川砂利を用いたものより6%大きいと述べている。<sup>159)</sup> 西林らも、碎石コンクリートは川砂利コンクリートより細骨材率を5%大きくする必要があると述べている。また、骨材の粒度が多少変つても、同一コンシステンシーをえるに必要な単位水量はほとんど変らないが、不連続粒度の場合、荒木は、材料分離の傾向があると述べており、スランプの大きいコンクリートでは、大小粒の適当に混合した標準粒度の骨材を用いたほうがコンクリートのワーカビリチーはよくなつていく。<sup>160)</sup><sup>161)</sup>

しかしながら、スランプ数センチメートル以下のかた練りコンクリートのワーカビリチー・コンシステンシーに対する諸要因の影響についてはまだ十分に調査されていないので、今後実験的に検討を行なう必要がある。

したがって、ここでは製品用のかた練りコンクリートについてスランプ試験、V B試験、C F試験などを用いて、ワーカビリチー・コンシステンシーなどの試験を行ない、これに対する単位水量、単位セメント量、細骨材率、粗骨材粒度などの影響について以下検討を行なった。

#### (2) 単位水量、単位セメント量とワーカビリチー・コンシステンシーとの関係

##### 1) 実験の概要

骨材は、最大寸法20 mmの松山碎石、高知碎石および吉野川砂利(p. 25表-1. 4. 1

参照)と粗粒率 2.84 の吉野川砂を使用し、セメントは普通ポルトランドセメント(比重 = 3.15、28 日圧縮強さ = 41.4  $\text{N/mm}^2$ )を用い、かた練りコンクリートのワーカビリティ、コンシステンシーにおよぼす単位水量、単位セメント量の影響を調べるためにつぎの 2 シリーズの実験を行なった。

実験Ⅰ：碎石 2 種と川砂利を用いた 3 種コンクリートについて目標スランブを 0.5 ~ 6 cm (実測値 0.2 ~ 8 cm) の範囲にかえ、単位セメント量 320 Kg と 420 Kg との 2 種とした表 - 1.4.8(1) (p. 37 参照) に示す配合を用い、スランブ試験、VB 試験、CF 試験を行ない、配合とワーカビリティ・コンシステンシーとの関係を骨材の粒形を考慮して検討した。

実験Ⅱ：実験Ⅰの結果を参考にし、松山碎石と川砂利とを用い、とくにスランブが 3 cm 以下のごくかた練りの場合について調べた。前実験と同様に単位セメント量は 320 Kg と富配合の 420 Kg とを用い、碎石コンクリートと川砂利コンクリートとの単位水量差は、碎石のほうが 1.8 Kg 増とし、それぞれ目標スランブ 3 cm の場合より 3 Kg きざみに単位水量を減少して表 - 1.8.2 に示す 6 種の配合を用い、ワーカビリティ・コンシステンシーとの関係を調べた。

表 - 1.8.2 実験Ⅱに用いたコンクリートの配合

粗骨材の種類	最大寸法 (mm)	単位セメント (Kg)	単位水量の種類 (Kg)	単位粗骨材容積 ( $\text{m}^3$ )
松山碎石	20	320、420	183、180、177、174、171、168	0.586
吉野川砂利	20	320、420	165、162、159、156、153、150	0.606

注) 気温 27℃ の場合

強制練りミキサを用いてモルタルで 1 分、粗骨材を投入して 1 分練り混ぜたのち、練り板の上でシヨベルで数回切返えしたのち、代表試料を採取し、スランブ、VB 値、CF 値などのまだ固まらないコンクリートの試験を行なった。なお、VB 装置は振動数 3600 vpm、振幅 0.2 mm、加速度約 1.4 g のものである。また、空気室圧力方法による空気量の試験も行なった。

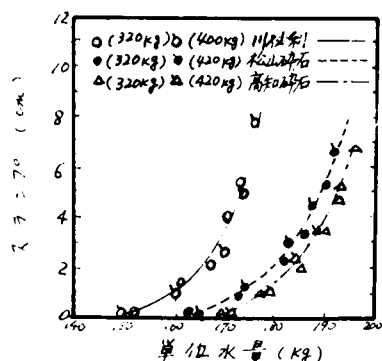
## 2) 実験結果とその考察

### 1) 粗骨材の種類および単位セメント量をかえたコンクリートの単位水量とワーカビリティ・コンシステンシーとの関係

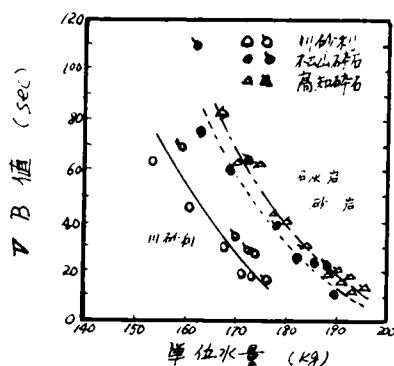
3 種類の粗骨材を用いたコンクリートについてえられた単位水量とスランブ、VB 値、CF 値などとの関係を図 - 1.8.1 (1) ~ (3) に示す。

図 - 1. 8. 1 粗骨材の種類、単位セメント量をかえた練りコンクリートの単位水量とスランプ、VB値、CF値との関係

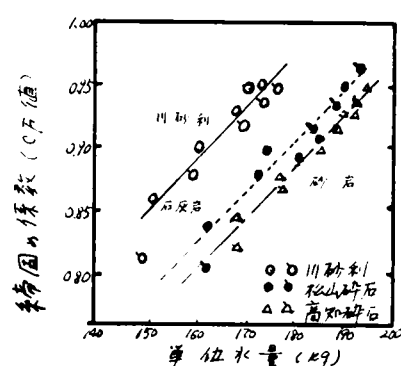
(1) 単位水量とスランプ



(2) 単位水量とVB値



(3) 単位水量とCF値



#### ① 粗骨材の種類の影響について

同一スランプをえるための単位水量は、粗骨材の種類や形状によつて相違する。碎石コンクリートでも岩種によってことなるが、川砂利コンクリートに比べて10～20 Kg (9～12%) 多く必要であり、柳田の報告<sup>65)</sup>とあまり差のない結果を示している。セメント協会の報告<sup>72)</sup>では、18～24 Kg (13～14%) となつており、両者の単位水量差が大きい。これは川砂利の最大寸法を25 mmとして碎石の20 mmより大きくしているためと考えられる。日本コンクリート会議の報告<sup>66)</sup>では、広範囲の碎石を用いているので、7～21 Kgと幅の広い単位水量差を示している。

同じ単位水量の場合、川砂利コンクリートに比べて碎石ではVB値は大きく、CF値は小となって締め固めにくいことを示しているが、コンシステンシーが同じであればVB値、CF値の場合とも碎石と川砂利との差はほとんどみられない。単位水量が少なくなつてごくかた練りになると碎石コンクリートのVB値が川砂利を用いたものよりわずかに低くなる傾向がある。

松山碎石と高知碎石との結果を比較すると、同じ単位水量では、高知碎石のほうがスランプ、CF値とも大きく、VB値は小となっている。これは、実験に用いた20～5 mmの粗骨材の粒形判定実積率と各種形状係数を求めて比較すると、表-1.8.2にみられるように実積率は大きな差はないが、高知碎石のほうが細長率が小さく、球形率が大で形状がや

表 - 1. 8. 2 3 種粗骨材の形状係数の比較

粗骨材の種類	粒形判定実積率(%)	細長率	方形率	偏平率	容積係数	球形率
松 山 碎 石	60.0	2.76	1.56	37.2	0.462	0.604
高 知 碎 石	59.3	2.44	1.51	34.4	0.447	0.629
吉 野 川 砂 利	64.7	2.35	1.40	32.7	0.450	0.657

注) 20～10 mm : 10～5 mm = 6 : 4、試料数 各50個



やすぐれているためと思われる。Kaplan<sup>164)</sup>は、粗骨材粒子の形状がコンクリートのワーカビリティに影響すると述べている。児玉も、骨材の粒形の相違はスランプに影響することを指摘している。なお、粗骨材の表面の粗滑の影響について山本は無視できる程度であると報告している。

## ② 単位水量の影響について

単位水量とスランプとの関係については、図-1.8.1(1)に示したように、川砂利と碎石コンクリートで少しことなるが、スランプ2.5cm以上と2.5cm未満では曲線の勾配が変わる傾向にあり、単位水量5Kgの差によるスランプの差あるいはスランプ1cmによる単位水量差を示すと表-1.8.3のようになる。スランプ試験では、碎石コンクリートのほうが川砂利コンクリートより単位水量の変化に対してやや鈍感である。

表-1.8.3 コンクリートの単位水量とスランプ

コンクリートの コンシステンシー	単位水量5Kgの差によるスランプの変化(cm)		スランプ1cmの差による単位水量の変化(%)	
	碎石コンクリート	川砂利コンクリート	碎石コンクリート	川砂利コンクリート
スランプ2.5cm以上	1.5 ~ 3	2 ~ 4	1.2 ~ 2.5	1.0 ~ 2.0
スランプ2.5cm未満	0.5 ~ 1.5	0.5 ~ 2	2.5 ~ 3.5	2.0 ~ 3.0

また、単位水量とVB値やCF値との関係は、3種骨材のコンクリートともほぼ同様の傾きを示しており、単位水量5Kgの変化に対してVB値では20~40秒、CF値は0.04~0.06変動する。とくに図-1.8.1(3)に示したように単位水量とCF値とは直線性がよいが、スランプ2~6cmのコンクリートであれば、VB値も直線状とみなされ(図-1.8.1(2)参照)、単位水量5Kgに対し、平均VB値は30秒、CF値は0.05の変動と考えられる。スランプ1cmの変動に対してVB値は5~10秒、平均でおおよそ8秒変化している。

## ③ 単位セメント量の影響について

図-1.8.1(1)のように単位水量が同じなら単位セメント量によるスランプの差異はみとめられず、一定単位水量の法則<sup>167)</sup>が成立することを示している。しかし、VB値とCF値との場合は、富配合になるとVB値は大、CF値は小となる傾向がみられ、セメント量が多くなると粘稠性をまして締め固めにくくなり締め固め時間を長くする必要のあることを示しており、これらの値はコンクリートのワーカビリティをある程度示していると考えられる。

## ii) ごくかた練りコンクリートの単位水量、単位セメント量とワーカビリティ・コンシステンシーとの関係

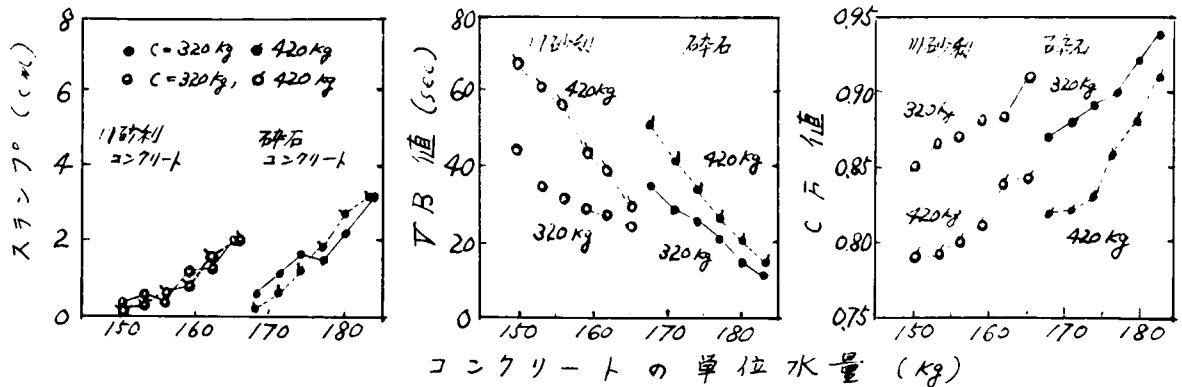
単位セメント量320Kgと420Kgでスランプ3cm以下のごくかた練りコンクリートについて単位水量とスランプ、VB値、CF値との関係を求めた結果を図-1.8.2(1)~(3)に示す。

図 - 1. 8. 2 単位セメント量をかえたごくかた練りコンクリートの  
単位水量とスランプ、V B 値、C F 値との関係

(1) 単位水量とスランプ

(2) 単位水量と V B 値

(3) 単位水量と C F 値



まず、スランプの結果では、ばらつきが多少あるが単位水量 5 Kg 差によるスランプの変動は前実験と大差なく、スランプを 1 cm 増減するのに、碎石、川砂利コンクリートとも約 5 Kg (3%) 増減する必要がある、一般のコンクリートの補正值 1.2% の値と比べるとかなり大きい。とくに、スランプ 1 cm 以下になると単位水量の変化に対してきわめて鈍感になる。<sup>65)</sup> 柳田は、スランプを 1 cm 増加させるのに単位水量 1.4% 増加する必要があるとしているが、これはスランプ 5 ~ 12.5 cm の一般土木用コンクリートであり、ごくかた練りになると補正值はかなり大となる。

なお、単位セメント量を 320 Kg から 420 Kg に増加しても、単位水量一定ならスランプはほぼ同じであり前実験と同様に一定単位水量の法則が成立しているのがわかる。

つぎに、単位水量と V B 値については図 - 1. 8. 2 (2) にみられるように、単位水量の増加とともにほぼ直線的に V B 値が減少しており、単位水量 5 Kg に対して 10 ~ 15 秒変動している。同一単位水量では、富配合のほうの方が明らかに V B 値は高いが、これは Powers<sup>65)</sup> の指摘しているように水セメント比が小となってセメントペーストの粘性が高くなり、せん断抵抗が大きくなるため、締固めにより大きなエネルギーの必要なためと考えられる。なお、単位水量が多くなってコンクリートがやわらかくなると単位セメント量の影響は小となっている。また、同じコンシステンシーでは、碎石のほうの方がわずかに V B 値は小さいが、これは川砂利より単位水量が 18 Kg 多くセメントペーストの水セメント比が大きいためと思われる。

図 - 1. 8. 2 (3) にみられるように、碎石、川砂利コンクリートとも単位水量の増加とともに C F 値は大きくなり、締め固めやすくなることを示している。また、同一単位水量では富配合コンクリートの締め固め係数が小となり、V B 値の場合と同様にワーカビリティの差を示しているものと思われる。なお、川砂利、碎石コンクリートとも、単位水量 5 Kg の変化に対して C F 値は 0.02 ~ 0.04 増加している。このように、V B 試験、C F 試験は単位水量のみならず単位セメント量による締め固めやすさの程度もみることが出来る長所がある。

(3) プレーンおよびAEコンクリートの細骨材率とワーカビリティ・コンシステンシーとの関係

1) 実験の概要

粗骨材は最大寸法 25 mm の鳴門砕石（比重＝2.60）と吉野川砂利（比重＝2.61）、細骨材は前実験と同じ川砂を用いた。プレーンおよびAEコンクリートについて細骨材率とワーカビリティ・コンシステンシーとの関係を求めるため、単位セメント量は 320 Kg の同一とし、表－1.8.4 に示すように、①単位水量を一定とし、細骨材率を 35～50 % の範囲内で 6 種類にかえた場合、②目標スランプが 6 cm と 2 cm の一定となるよう細骨材率と単位水量をかえた場合、の 2 グループの配合を用いた。なお、AE 剤はビルソン溶液を目標の空気量（4.5 ± 0.5 %）のえられるように使用した。

コンクリートは強制練りミキサで前節と同様に 2 分練り混ぜたのち、まだ固まらないコンクリートについてスランプ試験、VR 試験を行ない、細骨材率とワーカビリティ・コンシステンシーとの関係を調べた。なお、参考資料として、空気室圧力方法による空気量の試験、

表－1.8.4 使用したコンクリートの配合

(1) 単位水量一定の場合

コンクリートの種類	骨材の種類	目標* スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	単位水量 (Kg)	単位セメント量 (Kg)	水セメント W/C (%)	細骨材率 s/a (%)
プレーン	砕石	6	－	184	320	57.5	35、38、41、44、47、50
	川砂利	6	－	166	320	51.9	35、38、41、44、47、50
AE	砕石	6	4.5±0.5	172	320	53.8	35、38、41、44、47、50
	川砂利	6	4.5±0.5	152	320	47.5	35、38、41、44、47、50

\* 細骨材率 41 % の配合における目標値

(2) 目標スランプ一定の場合

コンクリートの種類	骨材の種類	目標* スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	単位水量 (Kg)	単位セメント量 (Kg)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)
プレーン	砕石	2	－	166～180	320	51.9～56.2	35、38、41、44、47、50
	川砂利	2	－	150～174	320	48.0～54.4	35、38、41、44、47、50
AE	砕石	2	4.5±0.5	154～167	320	48.1～52.2	35、38、41、44、47、50
	川砂利	2	4.5±0.5	143～158	320	44.7～49.4	35、38、41、44、47、50
プレーン	砕石	6	－	176～195	320	55.0～60.9	35、38、41、44、47、50
	川砂利	6	－	163～181	320	50.9～56.6	35、38、41、44、47、50
AE	砕石	6	4.5±0.5	168～179	320	52.5～55.9	35、38、41、44、47、50
	川砂利	6	4.5±0.5	153～166	320	47.8～51.9	35、38、41、44、47、50

\* 細骨材率 35～50 % の配合の場合の目標値、成形温度 27～29℃

および φ10 × 20 cm 円柱形型わくを用い供試体を 3 本採取し、材令 28 日で圧縮強度試験も行なつた。

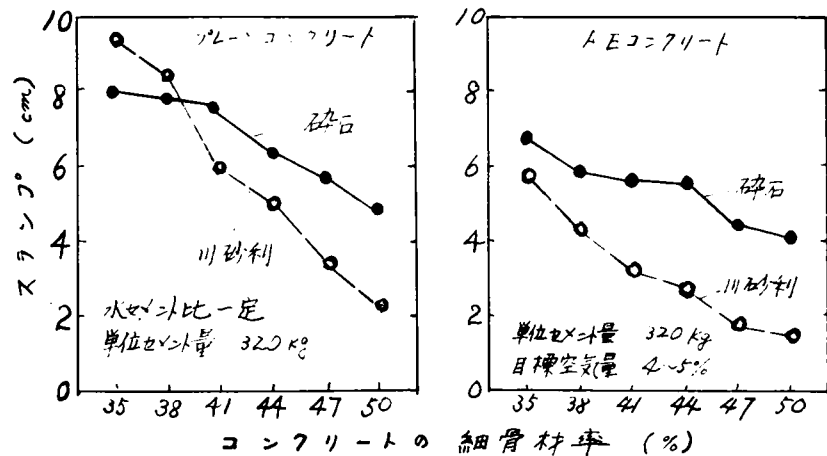
2) 実験結果とその考察

i) 細骨材率とスランプとの関係

単位セメント量と単位水量（水セメント比）が一定で、細骨材率とスランプとの関係を示すと図－1.8.3 のようになり、細骨材率を増加するとスランプは小となるが、この値は

細骨材率3%の増加に対して川砂利コンクリートで1～1.2 cm、碎石コンクリートでは0.5～1 cmの低下となり、プレーンおよびAEコンクリートともほぼ同様となっている。したがって、細骨材率が3%かわった場合、同一スランプを保つためには、碎石コンクリートでは単位水量を3～4 Kg (1.4～2.2%)、川砂利コンクリートでは3～5 Kg (1.5～3.0%) 程度かえる必要のあることを示している。なお、細骨材率をあげるとコンシステンシーが低下するのは、モルタルの粘稠性が増すためと考えられる。

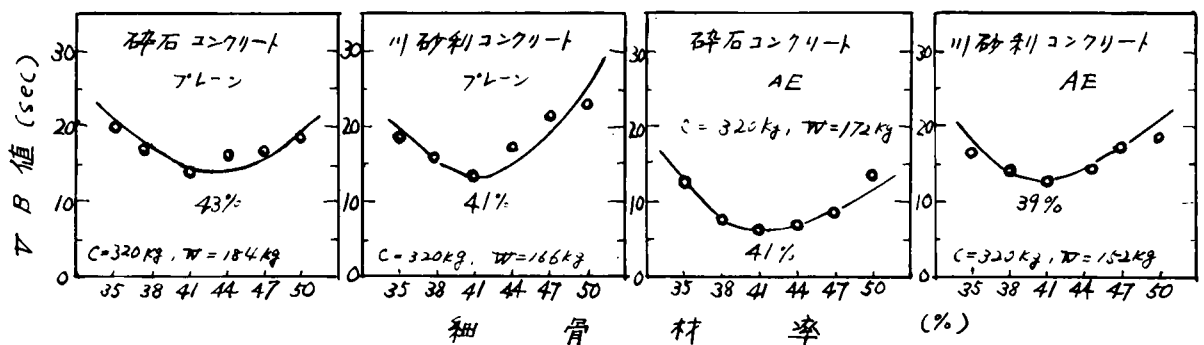
図 - 1. 8. 3 単位セメント量、単位水量一定の場合の細骨材率とスランプとの関係



## ii) 細骨材率とVB値との関係

単位水量、単位セメント量一定で細骨材率とVB値との関係を示すと図 - 1. 8. 4 のようになり、各コンクリートもVB値が最小になる細骨材率、すなわち最適細骨材率が存在している。

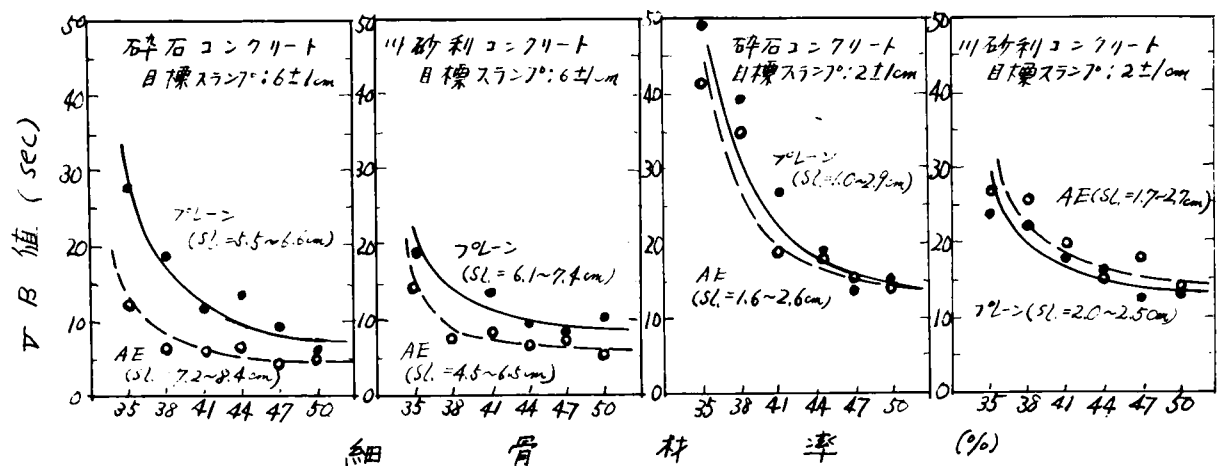
図 - 1. 8. 4 単位セメント量、単位水量一定の場合の細骨材率とVB値との関係



この値を図から読み取ると碎石および川砂利を用いたプレーンコンクリートでそれぞれ43%および41%、AEコンクリートではそれぞれ41%と39%となっている。川砂利コンクリートでは碎石を用いたものより2%小さく、AE剤を用いるとさらに2%低減できる。伊東らの報告<sup>158)</sup>に比べて、最適細骨材率が大きく、また碎石と川砂利との差も小さいが、本実験では粗骨材の最大寸法を25mmとしているためと思われる。

つぎに、スランプと単位セメント量を一定とした場合の細骨材率とVB値との関係を示すと図-1.8.5にみられるように細骨材率が増すにつれてVB値は小となり、コンクリートが締め固めやすくなることを示しているが、最適細骨率をすぎるとVB値の低下率はき

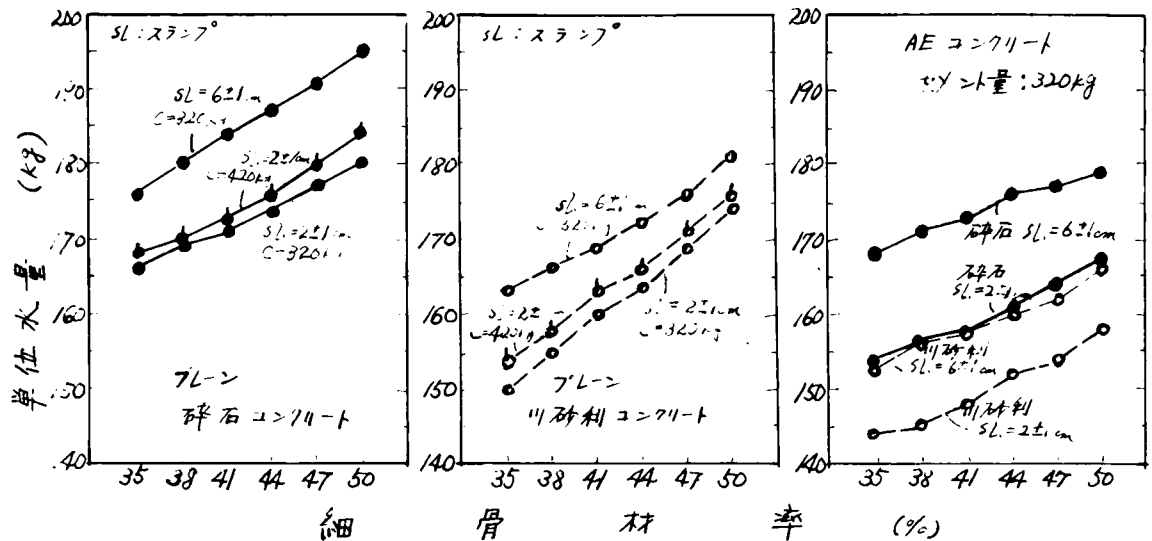
図-1.8.5 スランプが一定の場合の細骨材率とVB値との関係



わめて小さくほぼ横ばい状態となる。細骨材率が大きくなるとVB値が小となるのは、スランプが一定の場合、単位水量が多くなるので水セメント比が大となりしかもペースト量の増加するためと考えられる。これらの結果より、製品用配合では、使用骨材にあった最適細骨材率を選定するのが有利であることがわかる。

なお、コンクリートのスランプを一定とするために各細骨材率で単位水量をかえたので、この細骨材率と単位水量との関係を示すと図-1.8.6のとおりである。コンクリートがプラスチックでワーカブルな場合、細骨材率1%の増加に対して単位水量を1%増加すればよいと山本は報告しているが、この実験結果では細骨材率1%の増減に対する単位水量の増減は、プレーンコンクリートの場合、碎石と川砂利でそれぞれ約0.7%および0.8%、AEコンクリートではそれぞれ0.5%および0.6%程度であり、やや小さい値となっている。

図-1.8.6 スランブを一定とした場合の細骨材率と単位水量との関係



### Ⅲ) A Eコンクリートのワーカビリティについて

コンクリート中に微細な  $20 \sim 200 \mu$  程度の粒径の独立した気泡を連行する A E 剤の使用はコンクリートのワーカビリティをきわめて改善することが知られており、広くコンクリート配合に用いられている。

同じスランブのプレーンおよび A E コンクリートについて V B 値を求めたので、図-1.8.4 で同じ細骨材率の場合について比較すると A E コンクリートの V B 値がプレーンコンクリートの値より小さく、A E 剤を用いるとワーカビリティがよくなり締め固めやすくなることを示している。とくに、碎石コンクリートではこの傾向が顕著で、A E コンクリートの V B 値はプレーンに比べ  $40 \sim 50\%$  小となっている。これは第4章、第3節のべた A E コンクリートでは振動締め固め時間を多少短かくできることとも一致しており、碎石には A E 剤を用いるのが有利であることがわかる。

なお、スランブ一定にして求めた図-1.8.4の結果でもスランブ  $6 \text{ cm}$  の場合には明らかに A E コンクリートの V B 値がプレーンより小さい。しかし、スランブ  $2 \text{ cm}$  の場合になると大差がみられないが、これはごくかた練りになると空気連行性能の劣ることも一つの原因ではないかと思われる。

結局、同じコンシステンシーのコンクリートでも、V B 試験による V B 値では差が表われるので、この方法は材料の分離の程度はわからないがワーカビリティの良否をある程度判定できる有効な試験方法であるといえよう。

### Ⅳ) 細骨材率と空気量、圧縮強度との関係

空気室圧力方法によつてまだ固まらないコンクリート中の空気量を測定した結果の一例を示した図-1.8.7にみられるように、細骨材率の増加とともに空気量は大きくなる。これは、空気量の多いモルタル量が増すため、細骨材率  $3\%$  の増加に対して、プレーンコンクリートで  $0.2 \sim 0.3\%$ 、A E コンクリートで  $0.3 \sim 0.5\%$  増となっている。

Gonnerman<sup>170)</sup> プレーンコンクリートより A E コンクリートのほうが細骨材率の低下による空気量の低下率は大きいことを示している。

つぎに、単位水量と単位セメント量を一定にした場合の細骨材率と圧縮強度との関係を示すと図-1.8.8のようになり、最適細骨材率のものが必ずしも圧縮強度は最高値を示

図 - 1. 8. 7 細骨材率と空気量との関係

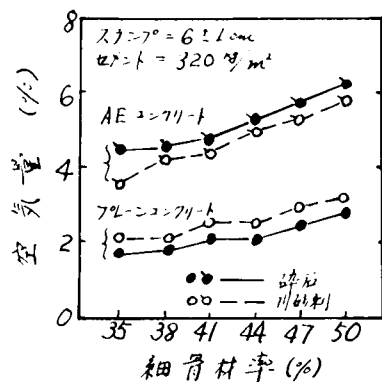
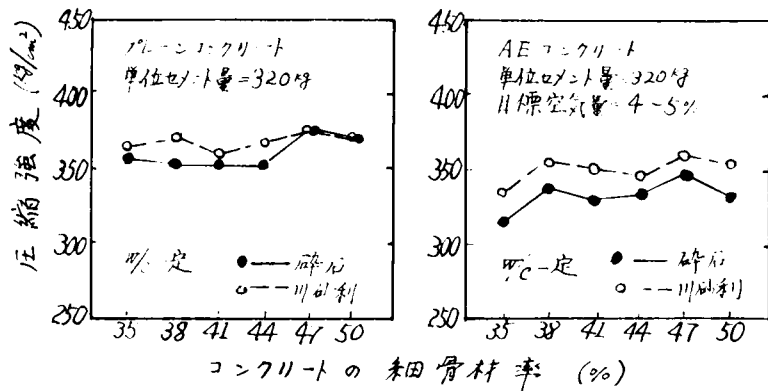


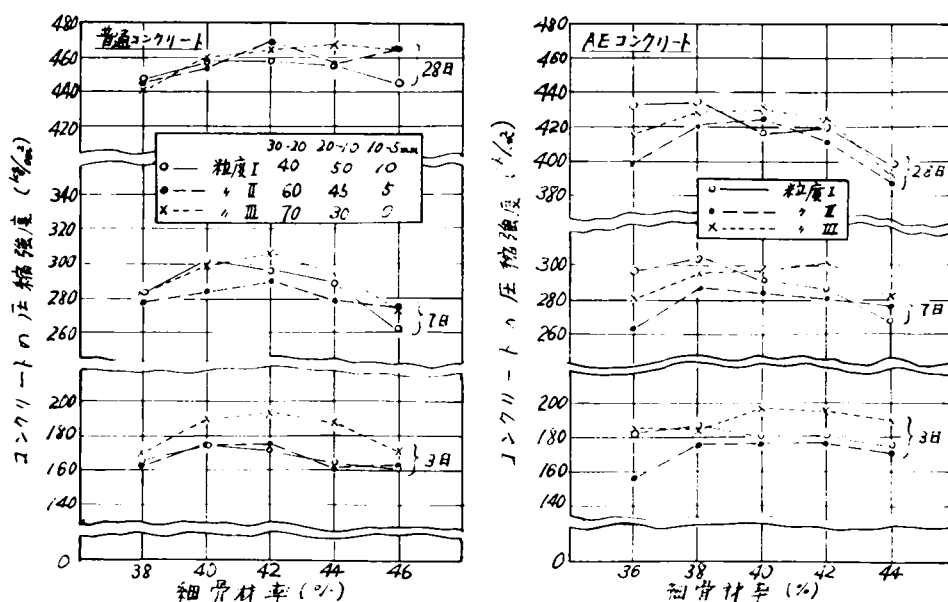
図 - 1. 8. 8 単位水量、単位セメント量を一定にした場合の細骨材率と圧縮強度との関係



さないが、これはコンクリートの水セメント比が一定のためと考えられ、コンシステンシーを一定とすれば、最適細骨材率をとった場合には単位水量が減少できるので圧縮強度は少し高くなるものと思われる。

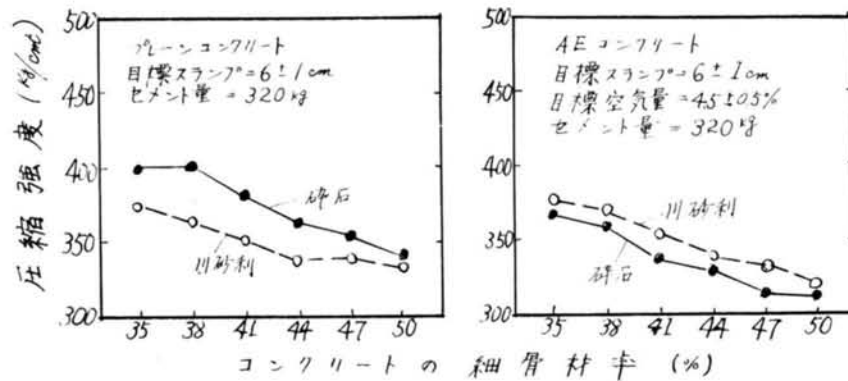
すなわち、最大寸法 25 mm、単位セメント量 350 kg で、3 種粒度の川砂利を用いたコンクリートについて細骨材率を 5 種にかえ、目標スラブを  $6 \pm 1$  cm の一定として圧縮強度との関係を調べた結果、<sup>171)</sup> 図 - 1. 8. 9 にみられるようにコンシステンシーが一定であれば圧縮強度が最大になる細骨材率が存在している。

図 - 1. 8. 9 3 種粒度の川砂利を用いたコンクリートの細骨材率と圧縮強度



つぎに、コンクリートのスランブを一定として細骨材率を変えた場合は、スランブ 6 cm の場合に示した図 - 1.8.10 にみられるように、細骨材率が大となるにつれて圧縮強度は下がる傾向がある。これは、細骨材率の増加とともに水セメント比の大となること、空気量のやや増すことなどのためと思われる。

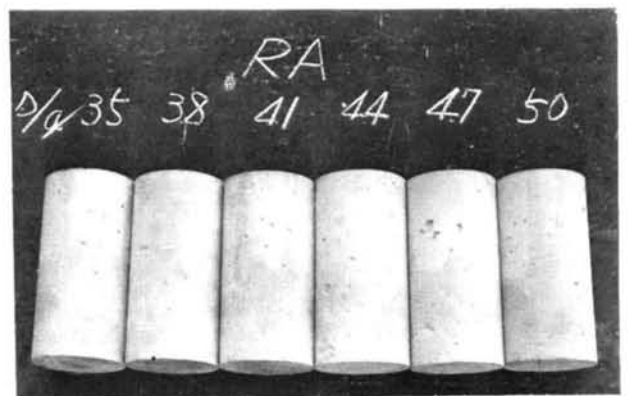
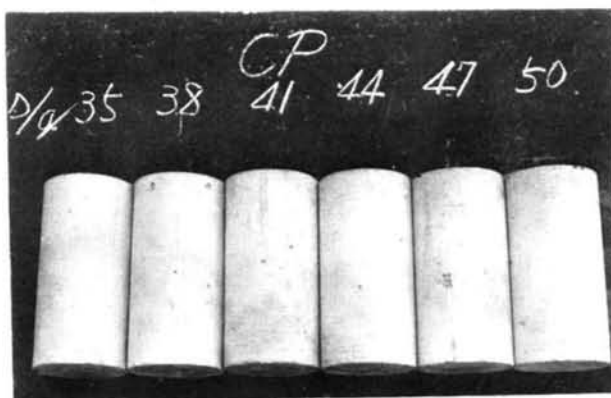
図 - 1.8.10 スランブ、単位セメント量を一定にした場合の細骨材率と圧縮強度との関係



なお、コンクリート製品では、はだ面をよくするために細骨材率を多少大きくする傾向があるが、細骨材率をかえた場合ははだ面の一例を示すと写真 - 1.8.3(1)、(2)のように顕著な差は認められず、超かた練りコンクリートの場合のような効果はみられない。しかし、表面仕上げやすさの点では細骨材率を大きくするのが有効であると考えられる。

写真 - 1.8.3 細骨材率のことになったコンクリートのはだ面の一例

(1) 砕石コンクリート (プレーン、スランブ 6cm) (2) 川砂利コンクリート (AE、スランブ 6cm)



#### (4) 粗骨材粒度とワーカビリティとの関係について

##### 1) 実験の概要

近年、骨材の枯渇により、砕石や品質とくに粒度のよくない川砂利も用いられている。



また、工場生産される砕石では粒度を組合せて用いることも可能であり、ここではとくに粗骨材の粒度をかえ、コンクリートのワーカビリティにおよぼす影響について検討を行なった<sup>172)</sup>。

使用した骨材は、最大寸法 30 mm の鳴門砕石（比重 = 2.60、吸水量 1.30 %）と吉野川砂利（比重 = 2.61、吸水量 = 1.13 %）で、細骨材は粗粒率 2.79 の吉野川砂（比重 = 2.62、吸水量 1.17 %）である。粗骨材粒度の影響を調べるため、30 ~ 20、20 ~ 10 および 10 ~ 5 mm の 3 粒度区分にふり分け、棒突き法による実積率を求め、この値が最大になる中粒のない不連続粒度 A'6（実積率、砕石 = 65.9 %、川砂利 = 69.3 %）および土木学会の標準粒度範囲を通る E4（実積率、砕石 = 63.8 %、川砂利 = 66.1 %）のほか、30 ~ 20、20 ~ 10、10 ~ 5 mm 各粒度群を図 - 1.8.1.1 のように三角座標で示し、その交点で示される A5、A7、B5、B6、C5、C6、C7 など計 10 種の粒度を用いた。

なお、各粗骨材の粒度曲線を示すと図 - 1.8.1.2 のとおりである。

コンクリートは普通ポルトランドセメントを用い、単位セメント量は 320 Kg の一定とし、各粒度の粗骨材の実積率あるいは空げき率を考慮して 3 % 間隔で連続した 5 種類の細骨材率を用い、中央の細骨材率を用いた配合の目標スランプの範囲が 3 ~ 4 cm となるよう試し練りによって単位水量を決めた。なお、単位水量は砕石コンクリートが 150 ~ 158 Kg、川砂利コンクリートが 136 ~ 140 Kg で、Powers<sup>160)</sup>の指摘しているように粒形が同じなら、空

図 - 1.8.1.1 使用した粗骨材の粒度を示す三角座標

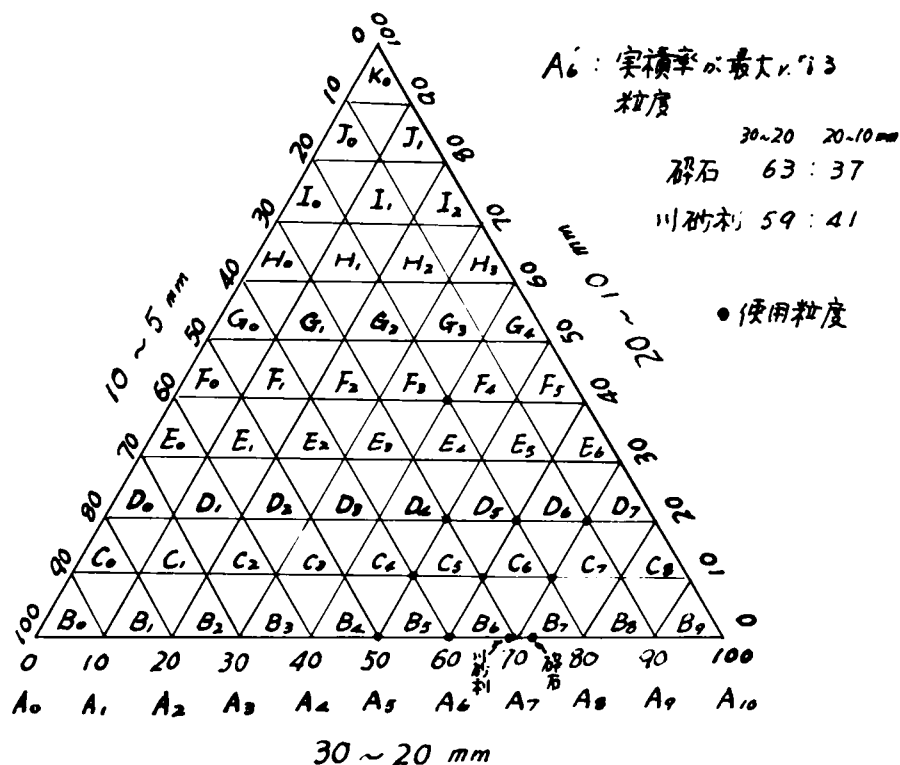
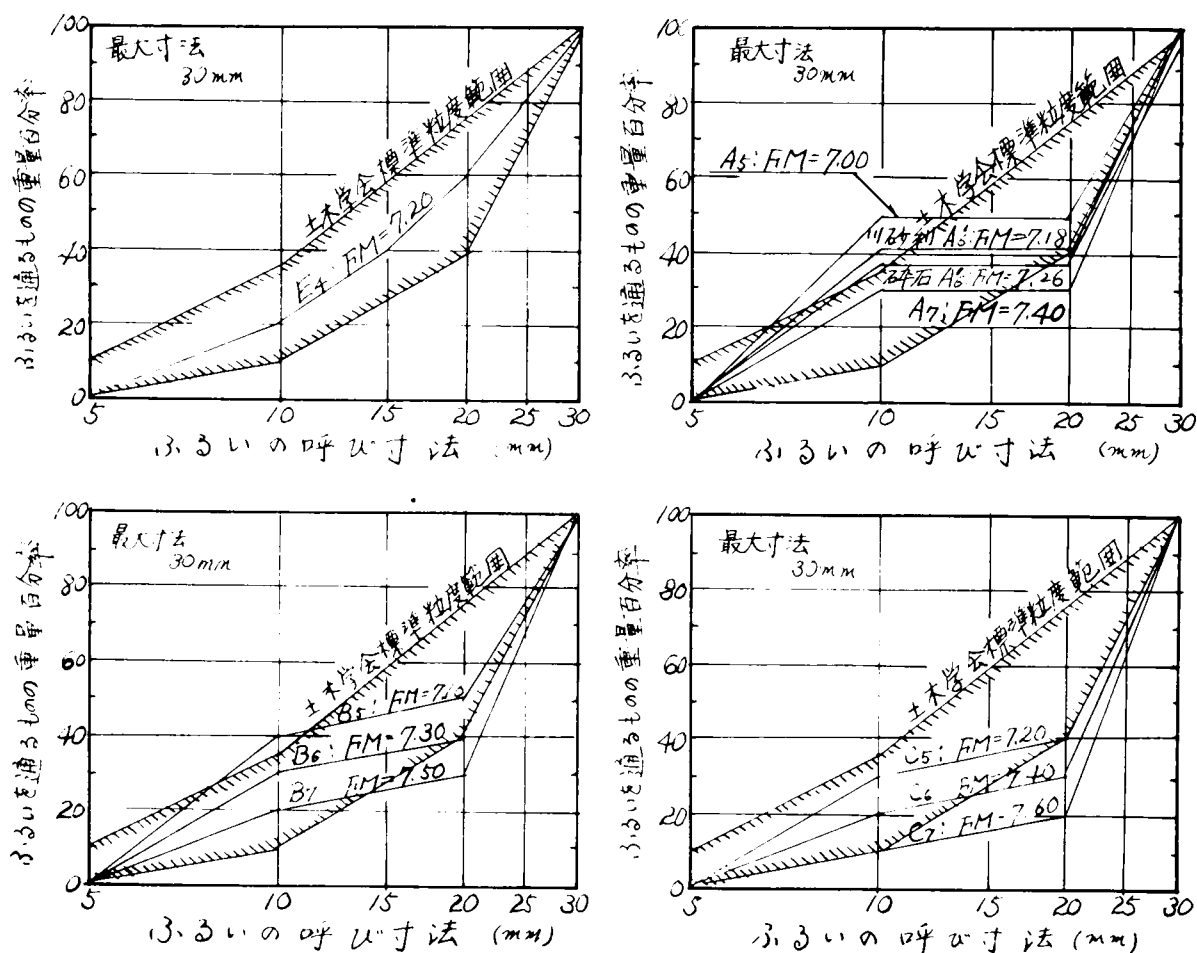


図 - 1.8.12 使用した粗骨材の粒度曲線



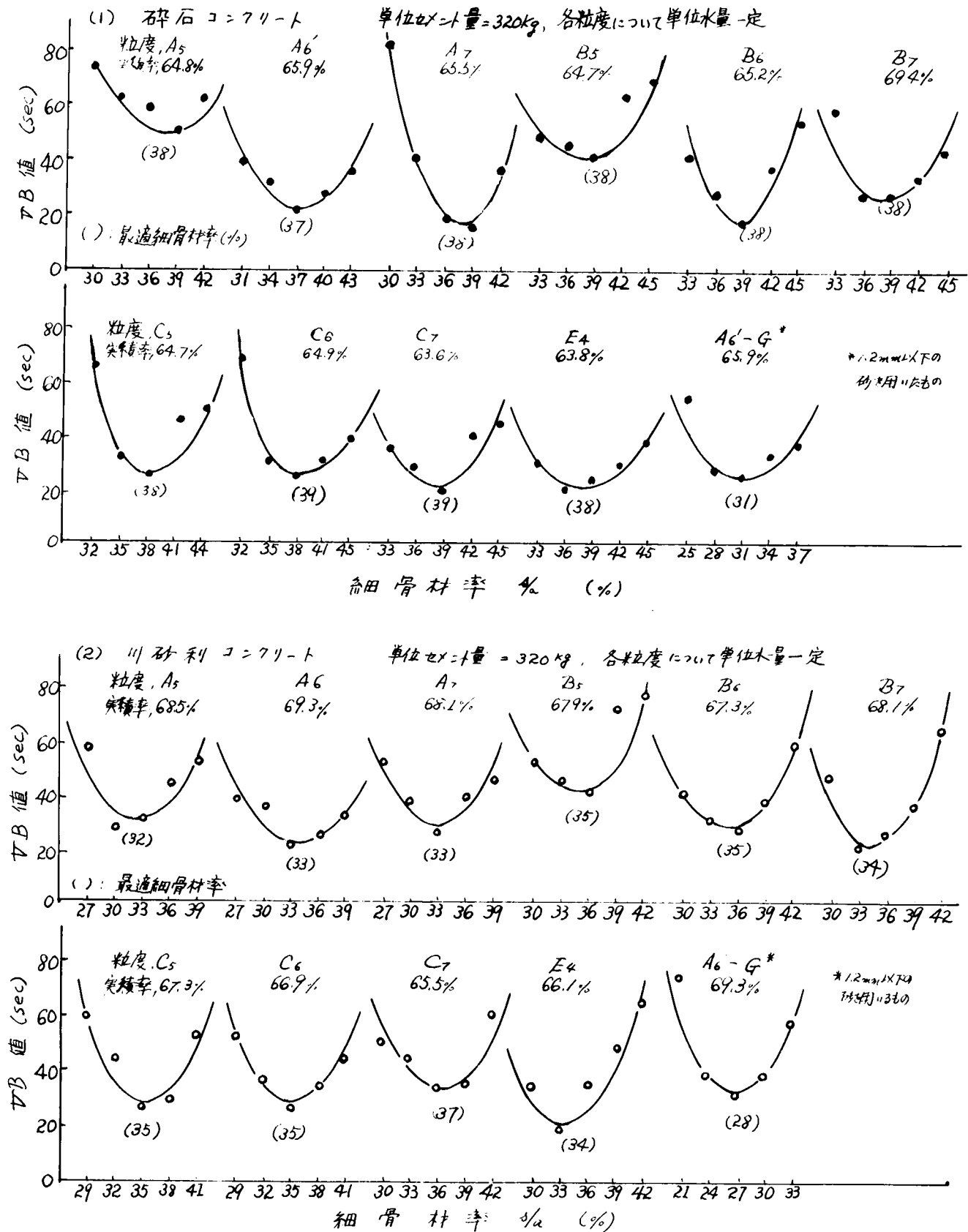
げき率または実積率がかわつても水量が多くなる傾向はみられなかった。また、実積率の小さい粒度の骨材を用いたコンクリートは分離しやすい傾向があるので、細骨材を 1.2 mm 以下（粗粒率 = 2.17）とした配合 A<sub>6</sub> - G も用いた。この場合、単位水量は碎石コンクリートで 4 Kg、川砂利コンクリートでは 2 Kg 大となっている。

強制練りミキサを用いてモルタルで 1 分、粗骨材を投入して 1 分、計 2 分練りののち排出し、十分に切返したのちスランプ試験と V B 試験を行ない、細骨材率とワーカビリティとの関係について調べた。また、参考資料として空気室圧力方法による空気量の試験と、 $\phi 10 \times 20$  cm の円柱形型わくを用いて、供試体を振動台（振動数 5000 vpm、加速度 1.1 ~ 1.2 g、振動時間 30 秒）で締め固め成形し、材令 28 日の圧縮強度試験も実施した。なお、V B 装置は振動数 3600 vpm、全振幅 0.2 mm 加速度約 1.4 g の振動条件のものである。

## 2) 実験結果とその考察

単位セメント量 320 kg の一定で、碎石と川砂利について粒度を変えたコンクリートについて細骨材率と V B 値との関係を求めた結果を図 - 1.8.13 に示す。この結果にみられるように、いずれの粒度の場合でも、V B 値が最小になる最適細骨材率が存在することを示しているが、この最適細骨材率は粒度によってかなりことになっている。また、粒度によって V B 値そのものも多少相違するが、図 - 1.8.12 の粒度曲線で 1.0 ~ 5 mm の小粒の多い粗骨材（A<sub>5</sub>、B<sub>5</sub>）を用いたものが、他の粒度のものより V B 値がわずかに大となる傾向がある。

図 - 1. 8. 1 3 粗骨材粒度をかえたコンクリートの細骨材率と V B 値との関係



碎石と川砂利はもとより、同じ形状の粗骨材でも各粒度によって最適細骨材率がことなるので、この値を図から読み取り、粒度を表わす値として実積率あるいは空げき率を用いて両者の関係を示すと図-1.8.14のようになり、最適細骨材率と実積率あるいは空げき率との間に直線関係が認められる。したがって最小2乗法を用いて1次式を求めるとつぎのようになる。

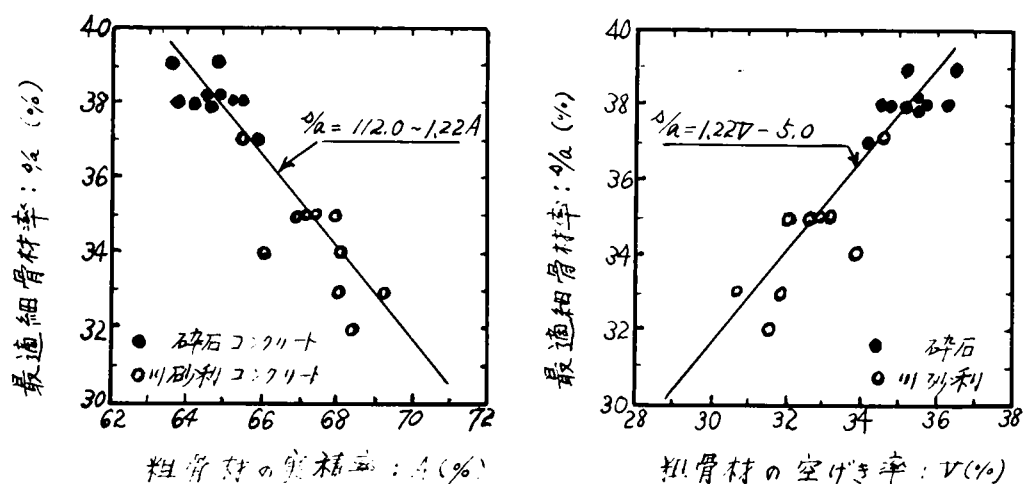
$$s/a = 117.0 - 1.22A \dots\dots\dots (1.8.1)$$

$$s/a = 1.22V - 5.0 \dots\dots\dots (1.8.2)$$

ここに、 $\begin{cases} s/a & : \text{最適細骨材率 (\%)} \\ A & : \text{粗骨材の実積率 (\%)} \\ V & : \text{粗骨材の空げき率 (\%)} \end{cases}$

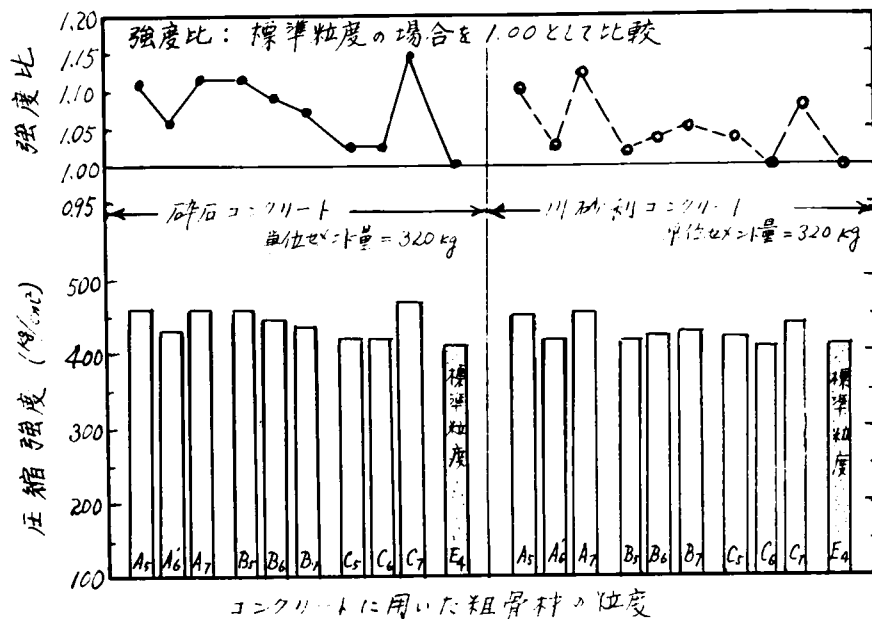
この結果より粗骨材の実積率が1%減少するかあるいは空げき率が1%ますと、細骨材率を約1.2%高くとる必要のあることを示している。山本<sup>166)</sup>は、実積率が1%ちがう場合、細骨材率を1%変えればよいと述べており、これに近い値を示している。なお、碎石コンクリートの最適細骨材率は川砂利を用いたものより2~6%、平均で4%大となっている。

図-1.8.14 最適細骨材率と実積率および空げき率との関係



なお、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  円柱供試体を用いて材令 28 日の圧縮強度も求めたので、最適細骨材率の結果を用いて、各粒度のコンクリートの圧縮強度を比較すると図 - 1.8.15 のとおりである。最密粒度の粗骨材を用いたコンクリートが強度がもっとも高くなっているが、標準粒度の骨材を用いた結果に比べて実積率の大きい粗骨材を用いたほうが、明らかに強度は高くなる傾向がえられている。

図 - 1.8.15 各種粒度の粗骨材でつくったコンクリートの最適細骨材率を用いた場合の圧縮強度の比較



##### (5) ま と め

かた練りコンクリートのワーカビリティ、コンシステンシーなどにおよぼす単位セメント量、A E 割、細骨材率、実積率などの影響を調べた結果をまとめると、

- 1) 同一コンシステンシーをえるに要する単位水量は骨材の種類によってことなる。スランプ 2.5 ~ 7 cm のかた練りコンクリートでは、スランプ 1 cm の増減に対し碎石コンクリートで 1.2 ~ 2.5 %、川砂利では 1.0 ~ 2.0 % 単位水量の増減する必要があり、かた練りになるほどその補正值は大となる。
- 2) 単位水量が一定なら、単位セメント量を増加してもスランプは変らず一定単位水量の法則が成立するが、V B 値はやや大となり、C F 値は逆に小となる。
- 3) 単位水量、単位セメント量一定で、細骨材率をかえると V B 値が最小になる最適細骨材率が存在する。この値は碎石コンクリートのほうが川砂利を用いたものより約 2 % 大きく、A E コンクリートでは両者ともおよそ 2 % 小さい値となる。
- 4) スランプと単位セメント量一定では、細骨材率をますと単位水量が増加し、V B 値、強度は小となる。細骨材率 1 % の増加に対し、単位水量はプレーンコンクリートで 0.7 ~ 0.8 %、A E コンクリートで 0.5 ~ 0.6 % 多くなる。
- 5) 同一コンシステンシーの場合、A E コンクリートの V B 値はプレーンより小さく、コンクリートがワーカブルで締め固めやすくなることを示している。

- 6) 単位水量、単位セメント量一定で細骨材率をかえた場合水セメント比が同じなので圧縮強度は大差ないが、コンシステンシーも一定にすると最適細骨材率の場合、単位水量が少なくなるので、圧縮強度は少し高くなる傾向がある。
- 7) V B 値が最小になる最適細骨材率は粗骨材の粒度によってことなり、粒度の指標として実積率 (A, %) をとると、最適細骨材率 (s/a, %) との間につきの式が成立する。

$$s/a = 117.0 - 1.22A$$

したがって、粗骨材の実積率が 1 % 増加すると、最適細骨材率を約 1.2 % 減少することができる。また、同じ粒度の場合、碎石コンクリートの最適細骨材率は川砂利を用いたものより平均で約 4 % 大となっている。

#### § 4. 超かた練りコンクリートのコンシステンシー

##### (1) まえがき

まだ固まらない超かた練りコンクリートは、湿った土のような状態いわゆるパサパサ状態であるためワーカビリティが悪くその測定はきわめて困難であると考えられる。また、水量の多少によるコンクリートのやわらかさの程度を示すコンシステンシーの値も、一般に用いられているスランプ試験ではゼロとなって、同じゼロに対する差異をみることはできない。

もちろん、まだ固まらない超かた練りコンクリートは、振動締固めができるだけ容易であり、即時脱型したときに変形したり、材料が分離し型くずれしたりすることがないようにするのが望ましく、実際問題として湿った土のようなパサパサ状態のコンクリートの性質が測定できるときわめて便利である。作業性すなわちワーカビリティと呼べないこともないが、水量の多少によるコンクリートの湿り方の程度といった意味からコンシステンシーとみなすのが適当と考えられる。

かた練りコンクリートのワーカビリティ・コンシステンシーの測定方法は前述した V B 試験、C F 試験のほか、振動式コンシステンシーメーターによる流動性試験方法、<sup>145)</sup> 上方から振動しながら押えて行く振動式ワーカビリティ測定器による方法なども提案されている。<sup>173)</sup> とくに、超かた練りコンクリートに対しては、石神が<sup>136)</sup> 重錘と型わくをフローテーブルに取り付けた充てん装置について報告しており、山本らは<sup>133)</sup> 実際に振動締固め成形に使用する振動台に型わくを取り付け、加圧してモルタルの上昇する時間を求めているが、これは V B 装置とほぼ同様とみなされる。

超かた練りコンクリートは、振動台で締固め成形を行なうわけであり、振動台式の V B 装置と締固めやすさのわかる C F 装置が適当と考え、単位水量、単位セメント量、細骨材率などのコンクリートの配合をかえ、そのコンシステンシーに対する影響について検討を行なった。<sup>174)</sup>

##### (2) 実験の概要

粗骨材は最大寸法 20 mm の鳴門碎石 (比重 = 2.60) と吉野川砂利 (比重 = 2.61)、細骨材は粗粒率 2.81 の川砂を用い、セメントは比重 = 3.15 の普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートはゼロスランプの超かた練りとし、碎石および川砂利を用いた表 - 1.8.5 ①~③ に示す 3 種配合について検討を行なった。碎石コンクリートと川砂利コンクリートとの締固め係数がほぼ同じになるよう単位水量をかえた。

強制練りミキサを用い、モルタルで 1 分練ったのち粗骨材を加えさらに 1 分 30 秒練りまぜたのち、排出し、数回シヨベルで切返したのち、代表試料を用いて V B 試験とし C F 試験を行なった。なお、超かた練りなので V B 装置は振動数 3600 vpm、振幅 0.45 mm、加速度約 3.2 g として使用した。スランプの測定値はすべてゼロセンチメートルであった。

表 1.8.5 実験に用いたコンクリートの配合

## ① 単位セメント量、細骨材率一定で単位水をかえた場合

骨 材 別	最大寸法(mm)	単位セメント量(kg)	単位水量(kg) (水セメント比%)	細骨材率(%)
砕 石	20	300	103(34)111(37)119(40)127(42)135(45)	48
川 砂 利	20	300	96(32)104(35)112(37)120(40)128(43)	45

## ② 単位水量一定で単位セメント量、細骨材率をかえた場合

骨 材 別	最大寸法(mm)	単位セメント量(kg) (細骨材率%)	単位水量(kg)
砕 石	20	200(54)250(51)300(48)350(45)400(42)	127
川 砂 利	20	200(54)250(51)300(48)350(45)400(42)	112

## ③ 単位セメント量、単位水量一定で細骨材率をかえた場合

骨 材 別	最大寸法(mm)	単位セメント量(kg)	単位水量(kg)	水セメント比(%)	細 骨 材 率 (%)
砕 石	20	300	127	42	35、40、45、50、55
		400	127	32	30、35、40、45、50
川 砂 利	20	300	112	37	35、40、45、50、55

## (3) 実験結果とその考察

## 1) 単位水量の影響について

コンクリートの単位水量と V B 値との関係を示した図 - 1.8.16 にみられるように、超か

図 - 1.8.16 単位水量と V B 値

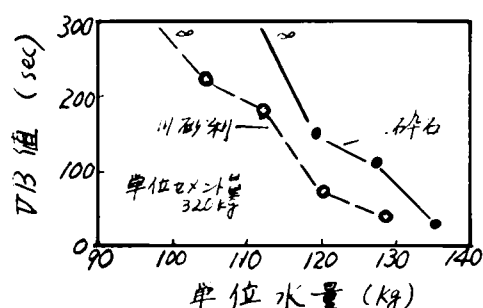
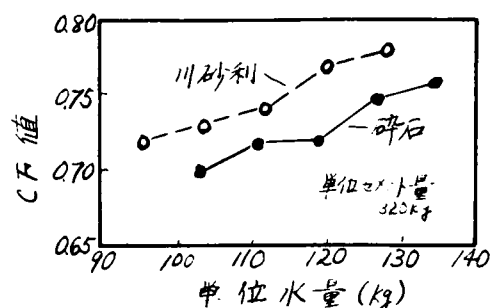


図 - 1.8.17 単位水量と C F 値



た練りコンクリートの単位水量がごく少ない場合は V B 値が無限大 (300 秒以上) となっており、本実験に用いた V B 装置では測定が困難である。なお、この場合、プラスチックの透明円板の上におもり 3 個をのせて測定しているが、円板全体にコンクリートの接する時間の判定もむづかしく、超かた練りには、振動数、振幅、加速度などを高くしたより強力な振動条件のものを用いる必要がある。

また、図 - 1.8.17 にみられるように、砕石、川砂利コンクリートとも単位水量がまると C F 値は直線的に増加し、V B 値の場合と同様に締め固めやすくなることを示している。なお、砕石と川砂利コンクリートとの V B 値を同じにするには、単位水量を約 7 kg、C F 値では約 1.5 kg 川砂利より多くする必要がある。

結局、VB値、CF値とも超かた練りコンクリートの単位水量の変化に敏感であり、単位水量5 Kgの増減に対して、VB値は約40秒、CF値は約0.02増減している。

## 2) 単位セメント量の影響について

図-1.8.18に示したように、単位水量一定のコンクリートで単位セメント量を増加して行くとVB値が最小になるセメント量が存在する。この値を、コンシステンシーあるいはワーカビリティからみた最適セメント量とすると、碎石コンクリートでは300 Kg、川砂利コンクリートで350 Kgとなっている。これは貧配合ではセメントベース量の少ないため、富配合ではコンクリートの粘稠性のますために締め固めるのに時間がかかりVB値が大きくなったと考えられる。しかし、単位水量が一定なのでセメント量250～400 Kgの配合ではVB値に大差はみられない。

図-1.8.18 単位セメント量とVB値

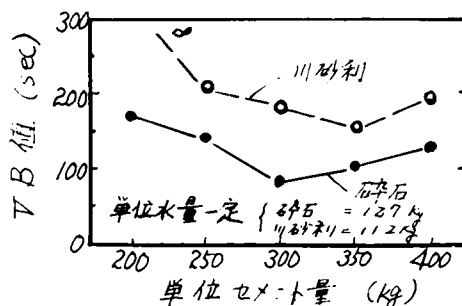
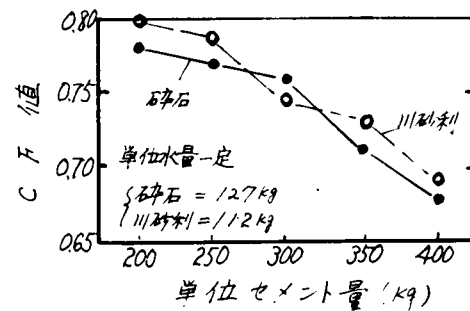


図-1.8.19 単位セメント量とCF値



一方、CF値は図-1.8.19のように単位セメント量の増加とともに減少し、これは富配合になると粘稠性をまして落下時のつまりが悪くなるためと思われるが、VB値の傾向と多少こととなっている。超かた練りコンクリートでは、セメント量をあまり多くしすぎると、締め固めに時間がかかり仕上げがかえて困難となる傾向があるので、所要の品質にもよるが250～350 Kgのセメント量が適当と思われる。

## 3) 細骨材率の影響について

図-1.8.20にみられるようにVB値の場合は、細骨材率が大となるにつれて増加の傾向を示し、これは単位セメント量300 Kg、400 Kgの場合ともほぼ同様である。これは、細骨材率を大きくすると骨材の比表面積がまし、モルタルの粘稠性が大となり流動性が悪くなるためと考えられる。したがって細骨材率はやや低目にするのが有利であろう。

一方、CF値は、図-1.8.21に示したように細骨材率をかえてもほとんど変化がみられない。これは、単位水量、水セメント比が一定であるためと思われ、CF値は超かた練りコンクリートのコンシステンシーを示していると考えられる。

図-1.8.21の結果より、碎石および川砂利コンクリートの細骨材率を5%ますと、VB値は平均でそれぞれ約30秒および50秒増加する。したがって、同じVB値とするためには単位水量を約15 Kg増加する必要がある、これは阪本の研究結果とほぼ一致している。



図 - 1. 8. 2 0 細骨材率と V B 値

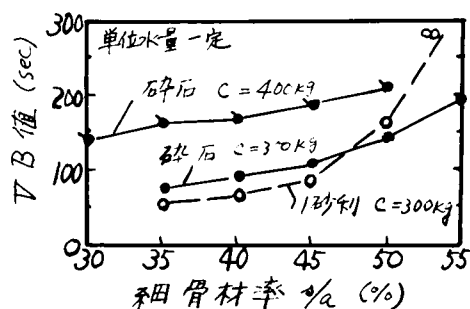
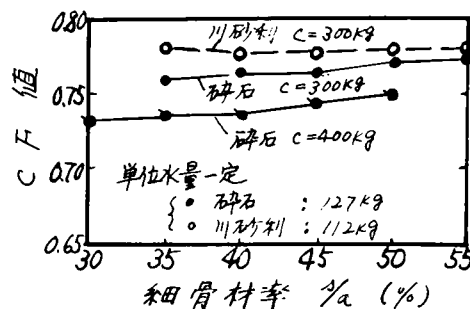


図 - 1. 8. 2 1 細骨材率と C F 値



#### 4) 水セメント比の影響について

C F 値と水セメント比との関係を示すと図 - 1. 8. 2 2 のようになる。水セメント比が大きくなるとセメントペーストの流動性がよくなって超かた練りコンクリートの締固めが容易になることを示していると考えられる。C F 試験は、超かた練りコンクリートに適用することは困難であるともいわれているが、このように水セメント比の変化と密接な関係があり、超かた練りコンクリートでも、そのコンシステンシー測定用として十分に実用性のあると思われる。なお、水セメント比が 50 % 以上になると増加率はかなり小さくなっているがこれは、ごく貧配合となるためである。なお、図 - 1. 8. 2 3 のように V B 値も水セメント比が増すと小さくなる傾向があるが、かなりばらつきが大でよい関係を示していない。

図 - 1. 8. 2 2 水セメント比と C F 値

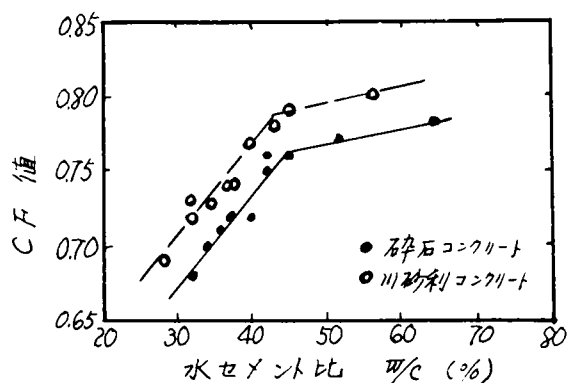
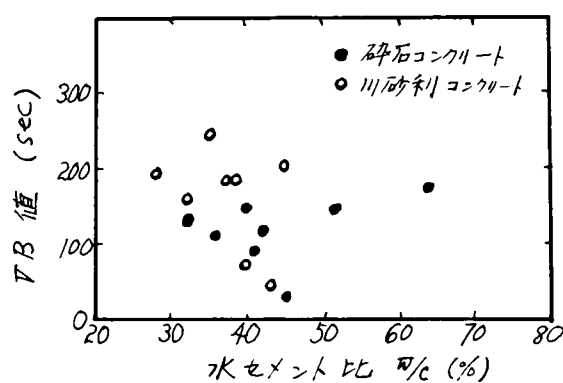


図 - 1. 8. 2 3 水セメント比と V B 値



#### (4) ま と め

超かた練りコンクリートの単位水量を減少すると V B 値は大となり C F 値は小となり、その単位水量の変化に敏感なので、ゼロスランプのコンクリートのコンシステンシー測定方法として V B 試験や C F 試験は有効であるといえる。とくに V B 試験は、振動締固め時間を決定する上からも好都合であるが、従来の加速度 3 g 程度までの V B 装置では、単位水量のごく少ない場合には測定が困難となるのでより強力な振動条件のものをを用いる必要がある。C F 値は水セ

メント比の変化ときわめて密接な関係を示しており、超かた練りコンクリートのコンシステンシー測定方法として十分に実用性があると考えられる。

## § 5. かた練りコンクリートに適した試験方法の検討

本章、第3節において0.2～7cmのスランブの範囲のかた練りコンクリートについてワーカビリティー、コンシステンシーなどにおよぼす諸要因の影響をスランブ試験、VB試験、CF試験などによって調べ、同時に試験方法についても若干の考察を行なった。この結果、スランブ、VB値、CF値いずれによっても、単位水量の多少によるコンシステンシーの差異をみることができるが、とくに

- ① VB値、CF値は単位セメント量の差異があらわれる。
- ② ごくかた練り（スランブ2.5cm以下）コンクリートでは、スランブは単位水量の変化にやや鈍感である。
- ③ VB値、CF値は単位水量とともにほぼ直線的に変化する。
- ④ AEコンクリートとプレーンコンクリートでは、同一スランブでもVB値はことなり、前者が小さい。

などのことが明らかになり、VB試験あるいはCF試験ではコンシステンシーのほかコンクリートの締固めやすさすなわちワーカビリティーもある程度みることができることを示しており、まだ固まらないかた練りコンクリートの試験方法としては、スランブ試験以上に望ましい試験方法であると考えられ、とくにスランブ2～3cm以下のごくかた練りコンクリートに適しているといえる。

したがって、スランブ3cm以下のかた練りコンクリートについてえられたスランブ、VB値、CF値などについて、スランブとVB値との関係を図-1.8.2.4に、スランブとCF値との関係を図-1.8.2.5に、VB値とCF値との関係を図-1.8.2.6に示し、考察を行なった。

図-1.8.2.4 スランブとVB値との関係

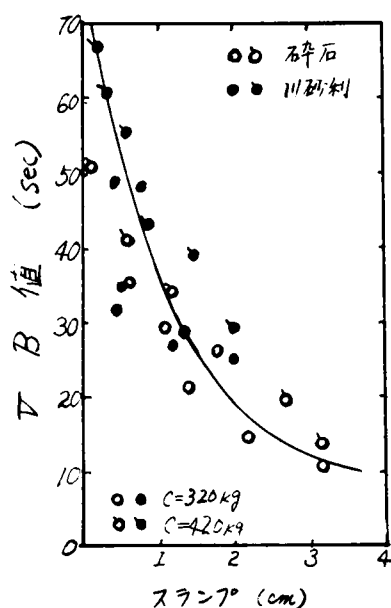


図-1.8.2.5 スランブとCF値との関係

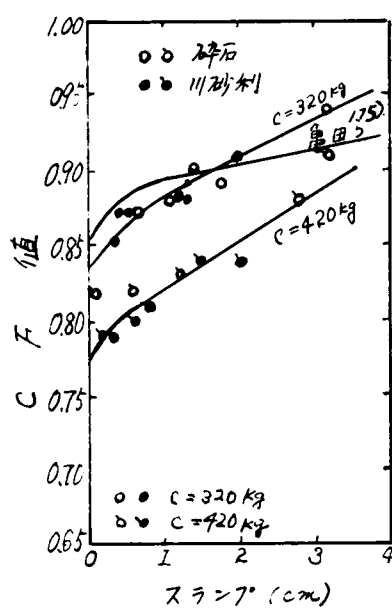
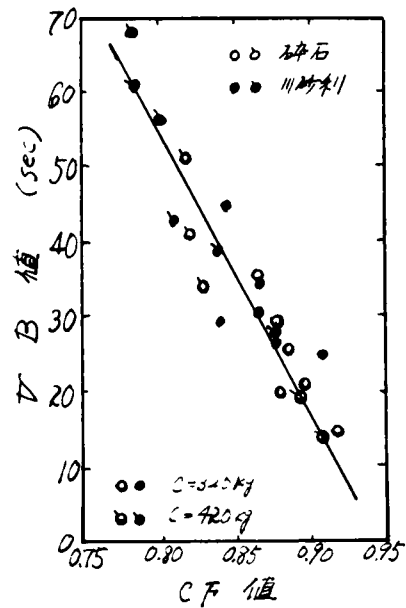


図-1.8.2.6 VB値とCF値との関係

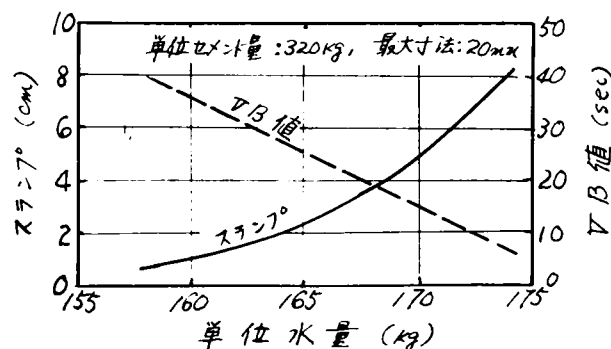


まず、スランプとVB値との関係を見ると、スランプが小さくなるとVB値の増加率が大きくなり、VB値のほうに単位水量による差が顕著にあらわれる。ごくかた練りになると同一スランプでは、碎石コンクリートのほうが川砂利コンクリートよりVB値が小となる傾向があるが、これは碎石コンクリートのほうが単位水量が多く、セメントペーストの水セメント比が大きいので振動を受けたとき早く流動化するため、前節の超かた練りコンクリートではより顕著な傾向がえられている。しかし、コンクリートの沈下は早い、第4章に述べたように碎石は角ばっているため粒子の再配列や安定化に時間がかかるので、締固め時間は川砂利より多少長くするのが望ましい。

スランプとCF値との関係も、ごくかた練りになると、CF値の差が大きくなる傾向がみられ、同一スランプでもセメント量によってCF値はことになっており、セメント量が多くなるとCF値は小となっている（図-1.8.25参照）。なお、VB値とCF値とは図-1.8.26のようになり、CF値がまずとVB値は直線的に減少している。

なお、第3章の0.2～7cmのスランプのコンクリートについて、単位水量とスランプ、VB値との関係を求めると図-1.8.27のようになり、VB値と単位水量とは直線性がよい。<sup>62)</sup>

図-1.8.27 単位水量とスランプ、VB値との関係



振動台を用いて機械的な締固め成形を行なうコンクリート製品いわゆる振動締固め製品では、締固め時間をどの程度とるかが、製造上の一つの重要な問題であるが、これはコンクリートのワーカビリティ、コンシステンシーなどとも関連しており、まだ固まらないコンクリートの試験結果が利用できればきわめて好都合である。

第3章の川砂利コンクリートの振動締固め条件を検討した場合に用いたコンクリートのスランプとVB値および振動締固め時間と強度との関係（図-1.3.9）より求めた最適締固め時間を示すと表-1.8.6のようになり、VB値より締固め時間の目安をつけることが可能である。とくに、VB試験装置の振動条件が実際に使用する振動台の締固め条件に近いと好都合である。なお、実際の工場製品では、部材の形状、寸法を考慮し、締め固められるコンクリートの表面状態も観察して締固め時間を決定しなければならない。

表 - 1. 8. 6 まだ固まらないコンクリートのコンシステンシー・ワーカビリティと最適締固め時間

コンシステンシー・ワーカビリティ		最適締固め時間 (sec)
スランプ (cm)	V B 値 (sec)	
0. 4	4 0	4 5 ~ 6 0
3. 1	2 3	3 0 ~ 4 0
7. 6	1 0	2 0 ~ 3 0

以上の結果より、製品用のかた練りコンクリートのワーカビリティやコンシステンシーの試験方法としては振動台式の試験装置たとえばV B試験のような方法がもっとも適しているといえる。

## § 6. 配合を修正する場合の指針について

一般の構造用コンクリートでは配合を修正する場合の指針が示されているが、本章§ 3で述べたようにスランプ数センチメートル以下のかた練りコンクリートでは多少ことなつた値となる。<sup>176), 177)</sup>また、コンクリート製品では使用する粗骨材の最大寸法が15~25mm程度の場合が多いので、最大寸法やスランプによる単位水量や細骨材率の補正值が明らかにされていると製品用配合を決定したり、補正する場合にきわめて好都合であり、ここでは最大寸法の影響と、配合を修正する場合の補正值について述べた。

### (1) 粗骨材の最大寸法による単位水量の補正

粗骨材の最大寸法を大きくすると同一コンシステンシーをえるために必要な単位水量が少なくてすみ、水セメント比が小となるので、部材寸法や施工上許される範囲内でできるだけ最大寸法を大きくするのがよいとされている。<sup>178)</sup>しかし、コンクリート製品ではその断面寸法が小さいものが多いので一般に20および25mmの最大寸法の粗骨材が用いられ、小径の管類では15あるいは10mm、大型のP C製品や無筋の土木用ブロック類では30mmあるいは場合によっては40mmのものが用いられることもある。

普通ポルトランドセメント、安倍川砂利、相模川砂を用いた富配合コンクリートの最大寸法と単位水量との関係、および鳴門碎石、吉野川砂利、吉野川砂を用いた単位セメント量320Kgの配合で求めた最大寸法と単位水量との関係<sup>179)</sup>を図-1.8.28に示す。これらの結果にみられるように粗骨材の最大寸法15~30mmの範囲では、最大寸法5mmの増減に対して、5~7Kgの単位水量の増減が必要であり、比率で示すと3~4%の増減となる。

したがって、使用セメント量とスランプ一定では粗骨材の最大寸法を大きくすると水セメント比が小となるので圧縮強度は明らかに増加するが、単位セメント量と水セメント比を一定にすると最大寸法とともに骨材の表面積が減少し、スランプが大きくなるため強度は低下の傾向を示している(図-1.8.29参照)。<sup>180)</sup>Walker<sup>180)</sup>も水セメント比が一定なら、最大寸法が大きくなるにつれて強度は低下すると述べている。

図 - 1.8.2.8 粗骨材の最大寸法と単位水量

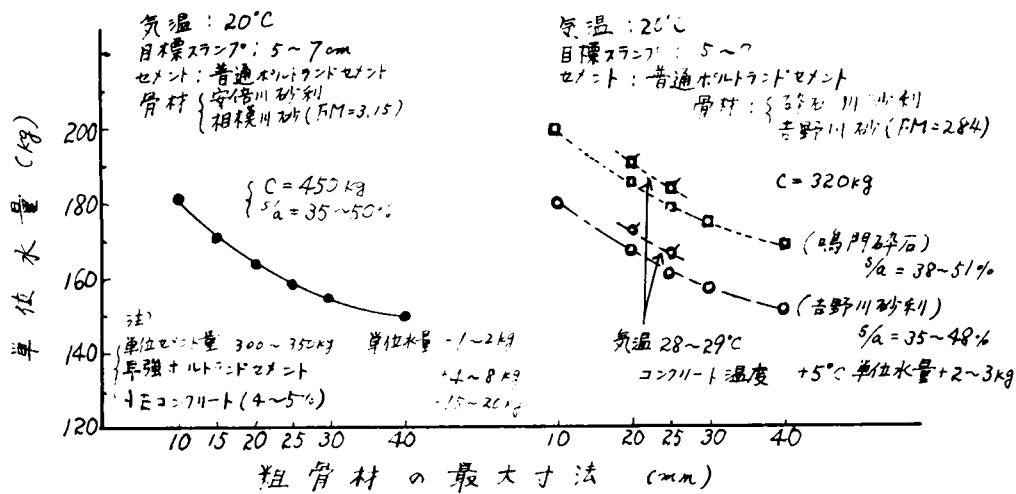
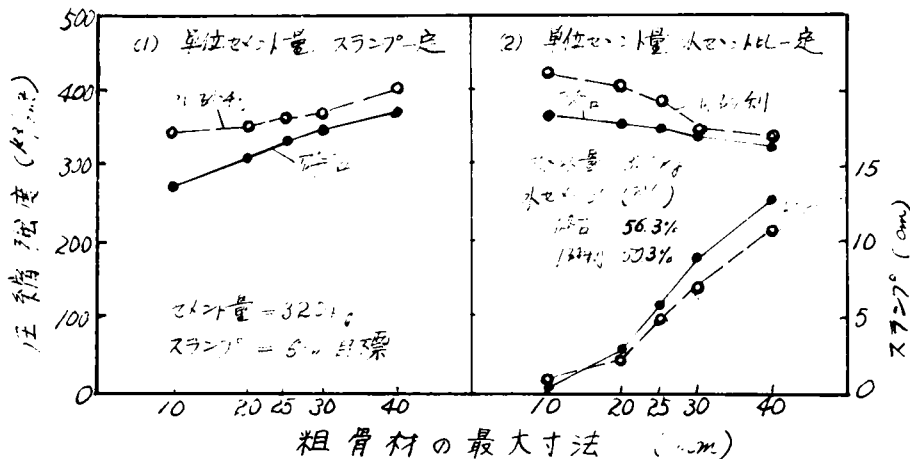


図 - 1.8.2.9 粗骨材の最大寸法と圧縮強度



なお、所定のコンシステンシーをえるための単位水量は、使用セメント、骨材、混和材料などの品質と使用量、細骨材率、コンクリート温度などの要因によって相違することを考慮しておかなければならない。とくに、図 - 1.8.2.8 の結果でもコンクリート温度が上ると単位水量が増すことを示しており、温度 5°C の増減に対し、単位水量 2~3 kg (1~2%) 増減する必要があることを示している。

## (2) かた練りコンクリートの配合を修正する場合の補正值

本章第 3 節でスランプ 0.2~7cm のかた練りコンクリートを用いて、コンシステンシー・ワーカビリティと単位水量、単位セメント量、細骨材率、粗骨材粒度などの関係について考察し、また最大寸法の影響について検討した結果をもとにして、最大寸法 15~30 mm の粗骨材を用いた製品用コンクリートの配合設計を行なう場合の補正值を提案すると表 - 1.8.7 のとおりである。

表 - 1. 8. 7 かた練りコンクリートの配合を修正する場合の補正表

変 わ る 条 件	砕 石 コ ン ク リ ー ト*		川 砂 利 コ ン ク リ ー ト	
	単位水量	細骨材率	単位水量	細骨材率
スランブ 1cmの増減に対して**	2.5cm以上	±1.2～2.5%	—	±1.0～2.0%
	2.5cm未満	±2.5～3.5%	—	±2.0～3.0%
細骨材率 1%の増減に対して	±0.5～0.7%	—	±0.6～0.8%	—
粗骨材の実積率 1%の増減に対して	—	干 1.2%	—	干 1.2%
粗骨材の最大寸法 5mmの増減に対して	干 5～7Kg	干 3～4%	干 5～7Kg	干 3～4%
コンクリート温度 5℃の増減に対して	± 2～3Kg	—	± 2～3Kg	—

\* 砕石コンクリートは川砂利コンクリートに比べて、同一コンシステンシーをえるのに単位水量おおよそ 10～20 Kg、細骨材率 3～5 % 増しとする。

\*\* スランブ 1 cm の増減に対し、V B 値はスランブおおよそ 2.5 cm 以上のとき 5～10 秒、2.5 cm 以下のとき 10～20 秒減増する。

なお、第 3 章より本章までの砕石コンクリートと川砂利コンクリートとの配合、おおよそ 60 種を比較すると、同一コンシステンシーをえるための単位水量は砕石の種類や粒形によってことなり、川砂利コンクリートより 9～20 Kg 多くなっており、細骨材率も 2～5 % 高くなっているが、単位水量を 10～20 Kg、細骨材率を 3～5 % 増しとするのがよいと思われる。

また、一般の製品工場では、スランブ 2.5～7 cm の範囲のコンクリートを使用している例が多いが、この範囲ではスランブによる単位水量の補正值はスランブ 1 cm の増減に対して砕石を用いたもので 1.2～2.5 %、川砂利では 1.0～2.0 % となり、スランブが小さくなるほど補正值を大きくとる必要がある。スランブと V B 値との関係もこの範囲ではスランブ 1 cm に対し、V B 値は 5～10 秒、平均で約 8 秒の変化となっている。

## § 7. 結 語

かた練りコンクリートのワーカビリティ、コンシステンシーなどにおよぼす単位セメント量、単位水量、細骨材率、粗骨材粒度などの諸要因の影響を調べ、あわせてかた練りコンクリートに適したまだ固まらないコンクリートの試験方法、配合の補正值についても検討した本章の研究結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 同一コンシステンシーをえるに要するコンクリートの単位水量は、粗骨材の種類や形状によってことなるが、砕石コンクリートは川砂利コンクリートに比べて 9～20 Kg 多くなり、最大寸法 20 mm の場合、砂岩砕石で平均 17 Kg、石灰岩砕石で平均 12 Kg 多く必要である。
- (2) スランブ試験、V B 試験、C F 試験によってもかた練りコンクリートのコンシステンシーを調べることができる。スランブ 2.5 cm 以下のごくかた練りになるとスランブは単位水量の変化に対して鈍感であるが、V B 値、C F 値は単位水量とともに直線的に変化し、ごくかた練りに適している。
- (3) 単位水量が一定なら、セメント量を増減してもスランブは変わらず一定単位水量の法則が認められるが、V B 値、C F 値はセメント量によって多少相違する。
- (4) 単位水量、単位セメント量一定で細骨材率をかえた場合、V B 値が最小になる最適細骨材率がえられ、この値は砕石を用いたブレンコンクリート約 43 %、川砂利コンクリートでは約 41 % であり、A E コンクリートにするとおおよそ 2 % 低い値となる。
- (5) スランブ、単位セメント量一定で細骨材率をかえると、細骨材率 1 % の増加に対して単位水量は 0.5～0.8 % 増加し、細骨材率の大きいほうが V B 値は小となり、ある一定値に近づく傾

向がある。

- (6) 粗骨材の粒度がことなると最適細骨材率( $s/a$ 、%)はことなり、粒度の指標として実積率( $A$ 、%)を用いると両者の関係はつぎの1次式で与えられる。

$$s/a = 117.0 - 1.22A$$

- (7) VB値はかた練りになった場合、単位水量の変化に対して敏感であり、締固め時間を決める目安にもなり、またAEコンクリートとプレーンコンクリートとの差もみられるので、かた練りコンクリートのワーカビリティの試験方法としてもっとも適していると思われる。
- (8) 超かた練りコンクリートでも、VB試験やCF試験によって単位水量の多少による締固めやすさの程度を判定することが可能であるが、超かた練りコンクリートに対するVB装置はより強力な振動条件のものが必要がある。なお、CF値は水セメント比と密接な関係がある。
- (9) 一般の工場製品に用いられる粗骨材の最大寸法15~30mmスランプ2.5~7cmの範囲のコンクリートでは配合を修正する場合、つぎの補正值が参考になる。

変 わ る 条 件	砕 石 コ ン ク リ ー ト		川 砂 利 コ ン ク リ ー ト	
	単 位 水 量	細 骨 材 率	単 位 水 量	細 骨 材 率
スランプ <sup>*</sup> 1cmの増減に対して	±1.2~2.5%	-	±1.0~2.0%	-
細骨材率1%の増減に対して	±0.5~0.7%	-	±0.6~0.8%	-
粗骨材の実積率1%の増減に対して	-	±1.2%	-	±1.2%
粗骨材の最大寸法5mmの増減に対して	±5~7Kg	±3~4%	±5~7 Kg	±3~4%
コンクリート温度5℃の増減に対して	±2~3Kg	-	±2~3 Kg	-

\* VB値(振動数3600vpm、加速度1.4gのVB装置)では5~10sec

## 第 9 章 結 論

川砂利、碎石および人工軽量骨材を用いた各種コンクリートを2種の振動台を用いて締固め成形し、その締固め効果におよぼす振動数、振幅、加速度、振動時間などの諸要因の影響について検討し、さらに混和材料や型わくの影響についても調べた。また、ゼロスランプの超かた練りコンクリートについても実験を加え、最後にかた練りコンクリートのワーカビリティ・コンシステンシーにおよぼす諸要因の影響およびその験方法や配合を修正する場合の指針についても検討した。これらの研究結果をまとめるとつぎのとおりである。

- (1) 川砂利を用いたかた練りコンクリートの振動台による最適締固め条件は、コンクリートのコンシステンシーによつて相違し、ごくかた練りのスランプ0.5～3 cmのコンクリートでは、振動数5000～6000 vpm、振幅1.0 mm前後、加速度13～20 gが適当であるがスランプ3～6 cmのコンクリートでは振動数4000～5000 vpm、振幅0.8 mm前後、加速度は5～13 gで十分締固めが可能である。コンクリートがかた練りになるほど締固め時間を長くする必要があるが、スランプ3～6 cmのコンクリートでは30秒前後が適当である。
- (2) 碎石コンクリートの最適締固め条件は、川砂利コンクリートと大差なく、振動数5000～6000 vpm、振幅おおよそ1.0 mm、振動時間は川砂利コンクリートより多少長く45～60秒とするのがよい。また、良質のAE剤や減水剤を用いると締固め効果がよくなり、プレーンコンクリートに比べて振動締固め時間を多少短縮することができる。
- (3) 7200 vpm、10800 vpmのような高振動数の振動台を用いて締固めを行なうと短時間で締固めが行なわれコンクリートのはだ面はよくなる傾向があるが、スランプ数センチメートルのコンクリートでは7200 vpmと10800 vpmの締固めとによる強度差はほとんどなく、加速度が同程度の低振動数振動台の強度とも大差がなく、むしろ低くなる傾向がみられ、コンシステンシーの大きいコンクリートでは振動数の影響が小さくなる傾向がある。
- (4) 振動台で締め固めた川砂利コンクリートと碎石コンクリートとの強度を比較すると、水セメント比とスランプとが一定の場合は碎石コンクリートの強度が川砂利を用いたものより明らかに大きい。セメント量とスランプ一定では単位セメント量320 Kgでは圧縮強度は大差ないが、420 Kgの富配合では、圧縮強度、曲げ強度とも碎石コンクリートのほうが大きくなる。
- (5) 軽量コンクリートの振動台による最適締固め条件は、造粒型と非造粒型のような骨材の粒形によつて多少こととなるが、振動数3000～4000 vpm、振幅0.8～1.0 mm、加速度5～10 gが適当であり、普通コンクリートに比べて低い振動数で締固めが可能であり、振動締固め時間も多少短縮できる。なお、鉛直回転方式の振動台では、型わくの小さい場合、スランプの小さい場合、振動時間の長くなる場合などに不規則な回転移動を生じ一度締め固められた組織を乱すことがある。
- (6) 振動台で締め固めたかた練り人工軽量骨材コンクリートの普通コンクリートに対する圧縮強度比は造粒型骨材で83～85%、非造粒型では68～75%である。また、曲げ圧縮比1/8～1/10 引張圧縮比は1/11～1/15 で普通コンクリートよりわずかに小さく、動弾性係数と静弾性係数との比は約1.3となる。なお、乾燥収縮は、同一セメント量の場合、短期材令では普通コンクリートより明らかに小さいが、乾燥収縮曲線より終極ひずみを求めると、大差ないかやや低目の値となる。
- (7) 振動台で締め固めた $\phi 15 \times 30$  cmの円柱供試体と $\phi 10 \times 20$  cm円柱供試体との圧縮強度あるいは動弾性係数はほぼ同じ値である。 $\square 15 \times 15 \times 54$  cmと $\square 10 \times 10 \times 40$  cmはり供試



(8) 碎石および川砂利を用いた超かた練りコンクリートを締め固める場合、同じ特性の振動台であれば振動数や加速度を大きくしたほうが締固め効果がよい。碎石と川砂利で最適締固め条件はことなり、碎石コンクリートでは低振動数で6000 vpm、川砂利コンクリートは高振動数振動台で10800 vpmで締固めたものが強度は高くなる傾向がある。振動締固め時間は長いほど強度は高くなるが、60秒前後が適当である。

(10) 超かた練りコンクリートの強度改善には、加圧成形やセメントの増量が効果的である。15%で3分間加圧成形し、20時間その圧力を保持すると28日強度は20~30%増加する。また、セメント50Kgの増量により28日強度はおおよそ100%大となり、超かた練りコンクリートは単位セメント量の変化に対して一般製品用のコンクリートより敏感である。

$$8/a \equiv 1 \ 1 \ 7 \ 0 \ - \ 1 \ 2 \ 2 \ A$$

(12) 超かた練りコンクリートでも V B 試験や C F 試験によつて、単位水量の多少による締固めやすさの程度を判定することが可能であるが、V B 装置はより強力な振動条件のものが必要である。なお、C F 値は水セメント比とさきわめて密接な関係があり、水セメント比の増加とともに大となる。

変 わ る 条 件	砕 石 コ ン ク リ ー ト		川 砂 利 コ ン ク リ ー ト	
	単 位 水 量	細 骨 材 率	単 位 水 量	細 骨 材 率
スランブ 1 cm の増減に対して	± 1.2 ~ 2.5 %	—	± 1.0 ~ 2.0 %	—
細骨材率 1 % の増減に対して	± 0.5 ~ 0.7 %	—	± 0.6 ~ 0.8 %	—
粗骨材の実積率 1 % の増減に対して	—	下 1.2 %	—	下 1.2 %
粗骨材の最大寸法 5 mm の増減に対して	下 5 ~ 7 Kg	下 3 ~ 4 %	下 5 ~ 7 Kg	下 3 ~ 4 %
コンクリート温度 5 °C の増減に対して	± 2 ~ 3 Kg	—	± 2 ~ 3 Kg	—

— 1 1 1 —

## 第 2 編 かた練りコンクリートの蒸気養生

### 第 1 章 緒 論

工場で製造されるコンクリート製品や工事現場のすぐ近くで打設される橋げた、はりなどの部材では早期に所要の強度を発現し、早く型わくを取りはずし、移動したり、出荷を早めるために、一般に常圧蒸気養生が行なわれている。

この蒸気養生に関しては、従来よりかなり多くの研究が行なわれており、とくに欧米、ソ連などでは研究が盛んであり、これらは蒸気養生に関する総合的な報告に紹介されているが、最適の蒸気養生条件やえられた結果は研究者によって多少こととなり、一般的な見解はまだ示されていない現状である。

今日、蒸気養生に関して大きくわけてつぎの 2 つの考え方が示されている。

- (1) 長期材令のコンクリートの品質を考慮して蒸気養生の際の最高温度をできるだけ低くする。
- (2) コンクリートに悪影響がなく、所要の品質のえられる範囲内で、できるだけ養生温度を高くする。

前者は、日本や米国の蒸気養生に対する見解であり、土木学会の「鉄筋コンクリート工場製品設計施工指針<sup>2)</sup>(案)」でも、促進養生を行なう場合にコンクリートにひびわれ、はく離、変形、長期材令における強度低下などの有害な影響を与えるものであってはならないと述べている。後者は、欧州、ソ連などの工場でみられるが、実際の製品では蒸気養生後の養生が不十分であり、初期材令で所要の品質をえてしかもその実物試験に合格すればよいとする考え方である。

蒸気養生の際の最適養生条件は、一義的に決定できるものではなく、ACI Committee 517<sup>187)</sup>では製品の種類によって適当な蒸気養生の基準を示しているが、製品の所要の品質、形状や寸法はもとより使用材料、配合、成形温度とも関係する問題であり、これらの要因とも関連づけて今後十分に研究を進める必要があると考えられる。

とくに、使用材料がコンクリートの蒸気養生におよぼす影響については、十分に調査されておらず、効果的な蒸気養生を行なうためには、これに適した品質のセメントや混和材料を選ばなければならない。また、単位水量、単位セメント量の多少や水セメント比などの配合の影響についても研究しなければならない。

つぎに、蒸気養生の際の養生条件の影響については、前養生期間、温度上昇速度、最高温度などに関しては多くの研究がなされているが、コンクリートの成形温度の影響や徐冷期間の効果、さらには蒸気養生後の湿潤養生の影響については明らかにされていない。

また、蒸気養生を行なったコンクリートの諸性質については、とくに圧縮強度について多くの研究が行なわれているが、標準養生に対する蒸気養生の効果のみならず、蒸気養生期間中のコンクリートの強度発現の状態についても調べる必要があるし、脱型強度の値を判断する一つの目安とされているマチユリチーとの関連も十分に究明しなければならない問題である。蒸気養生したコンクリートの引張強度、曲げ強度、付着強度、弾性係数、耐久性、水密性などに関する研究結果はきわめて少なく、圧縮強度以外の物性におよぼす蒸気養生の影響も研究されなければならない。

さらに、近年、製品工場で要求され研究課題となっている養生期間の短縮の可能性や 2 段階の蒸気養生方法のような工程の短縮、養生技術の改善の問題、あるいはこれと関連してひびわれや長期材令における品質の低下を生じない蒸気養生条件についても研究を行なう必要があると思われる。

超かた練りコンクリートを用い、成形後ただちに型わくを取りはずすいわゆる即時脱型を行なうコンクリートには、単位水量のきわめて少ないパサパサ状態の配合を用いるが、型わくによる拘束がないので、型わく養生を行なう場合とは最適養生条件はことなると考えられ、即時脱型製品の蒸気養生についても検討しなければならない。

コンクリートの常圧蒸気養生に関しては、今後研究を進めなければならない以上のような問題点が残されているが、ここでは、まず常圧蒸気養生とこれに関する既往の研究について述べたのち、つぎの5つの課題、すなわち

1. 蒸気養生に対する使用材料と配合の影響
2. 養生条件の影響と最適蒸気養生条件
3. 蒸気養生したコンクリートの諸性質
4. 蒸気養生期間の短縮について
5. 超かた練りコンクリートの蒸気養生

などについて実験的研究を行なったものである。

なお、一般の常圧蒸気養生のほかに高温高压の蒸気を用いるオートクレーブ養生、蒸気養生を用いるが成形方法を改善した加圧養生、蒸気以外の熱源を使用する電気養生、赤外線養生、高周波養生など種種の促進養生方法があり、今後研究を進めなければならない問題点も多いが、これらの促進養生の概要を既往の研究によって述べ、2, 3の実験結果を報告した。

最後に、コンクリートの品質判定には、材令28日の標準養生によっているが工程の管理上28日強度を早期に推定する必要がしばしば生じており、促進養生を利用したコンクリート強度の早期判定法についても考察を行なった。

## 第 2 章 常圧蒸気養生に関する既往の研究

### § 1. 緒 言

大気圧下で  $100^{\circ}\text{C}$  以下の温度で行なうコンクリートの常圧蒸気養生（以下蒸気養生という）は、コンクリート製品を製造する際の代表的な硬化促進方法として多くの国で採用されている。

したがって、蒸気養生に関しては従来より多くの研究が行なわれ、蒸気養生条件の問題、使用材料や配合の影響、蒸気養生したコンクリートの諸性質などについて検討され、その結果が報告されており、とくに最近では蒸気養生したコンクリートに対する化学的立場からの研究も行なわれている。<sup>188), 189)</sup>

ここでは、まず一般の製品工場で採用されている蒸気養生について述べ、つぎに従来より行なわれてきた研究の結果を使用材料と配合、蒸気養生条件、コンクリートの物理的性質、蒸気養生の設備の 4 部門にわけて調査し、コンクリートの蒸気養生に関する問題点を明らかにした。

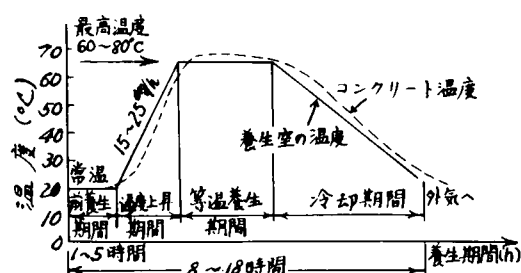
### § 2. 常圧蒸気養生について

製品工場で実施されている蒸気養生はボイラーで発生させた蒸気を配管で養生室に送って、ノズルから噴出させ、積み置いたコンクリート製品の養生を行なうもので、一般に蒸気養生の順序は、つぎの 4 段階にわけられる。

- ① 前養生期間：コンクリートを型わくに詰め終ってから蒸気を送るまでの期間で、セメント粒子周囲の水和が少し進み、セメントペーストの安定化する期間である。放置期間、送蒸待時間などとも呼ばれる。
- ② 温度上昇期間：蒸気を送り、一定の上昇速度で養生室の温度をあげ、コンクリートを加熱する期間で、セメントの水和を進め、次第に強度を発現する期間である。加熱期間ともいう。
- ③ 等温養生期間：養生室を一定の最高温度に保って、脱型や製品の移動に要する強度をえるまで養生を続ける期間で、セメントの水和が急速に進み、組織が安定し、強度が増大する。最高温度養生期間とも呼ぶ。
- ④ 冷却期間：養生室への通気を止めて温度を徐徐に下げる期間で余熱による保温養生によって強度発現も多少進む。温度下降期間、徐冷期間、ソーキング期間などともいう。

蒸気養生を行なう場合、通常は図 - 2.2.1 に示すように 1 ～ 数時間の前養生期間をとったのち通気を開始し、ゆるやかに温度をあげ、所定の最高温度期間をとったのち、蒸気を止めて徐徐に

図 - 2.2.1 蒸気養生の順序



養生室内で冷却し、外気温と大差がなくなってからコンクリート製品を取り出す。コンクリートの温度は養生室温に比べて多少ずれるが、普通セメントとB種高炉セメントを用いたコンクリートについてそのマチュリチー（養生温度×養生時間；度時で示される）を計算すると、表-2.2.1のようにほぼ同じ値となっている。

表-2.2.1 計画温度、養生室、コンクリート温度で求めたマチュリチーの比較

最高養生温度	(°C)	65	80
計画温度によるマチュリチー	(°C・h)	385	460
養生室温によるマチュリチー	(°C・h)	386	462
コンクリート温度によるマチュリチー	(°C・h)	385	471

\*  $\phi 10 \times 20$  cm円柱供試体の中央で測定

\*\* B種高炉セメントのコンクリート (C=360 Kg, W/C=46%)

\*\*\* 普通セメントのコンクリート (C=360 Kg, W/C=44%)

日本工業規格のある製品の中には、道路用コンクリート製品 (JIS A5304~5307)、遠心力鉄筋コンクリートボール (JIS A5309)、遠心力鉄筋コンクリート管 (JIS A5303) などのように蒸気養生条件の示されているものもあり、製品によって多少こととなるが、つぎのように規定されている。

- (1) 型わくのまま蒸気養生室に入れ、室温を均等にあげる。
- (2) 練り混ぜてのち2~3時間以上たってから通気する。
- (3) 温度上昇速度は20 deg/h 以下とする。
- (4) 養生室の最高温度は65°C以下とする。
- (5) 徐々に温度を下げ、外気温と大差がなくなってから出す。

蒸気養生には、このような一般的な規則があるから、これを守らなければその養生効果を十分に期待することはできない。すなわち、成形後、前養生時間をとらないで、ただちに通気したり、急激な加熱をしたり、型わくで密閉、加圧しないのにきわめて高い温度で養生したり、高温の製品を室外に取り出して急冷したりすると、ひびわれ発生、強度発現の不振などコンクリートに有害な影響を与えることになる。

しかしながら、最適の蒸気養生条件は、使用材料、配合比、外気温などによってもかなりことなり、また製品の形状、寸法、所要強度、工程によってもかなり相違してくるので、製品について十分に検討し、経済性も考慮して最善の方法を採用する必要がある。このためには、養生条件、養生方法など養生技術の改善について今後さらに研究しなければならない。

従来、わが国の製品工場では、一般に1日1サイクルの蒸気養生条件を採用し、夜間を利用して十数時間の蒸気養生を行ない、脱型時の1日で28日強度の50~60%の値をえて、その後さらに水中養生、散水養生、空中養生などの後養生を行なっている。しかし、最近では1日2サイクルの蒸気養生が目標とされており、品質をそこなわない条件で10時間以内の短時間養生も採用される傾向にあり、養生時間の短縮は新しい研究課題とされている。なお、蒸気養生効果を十分に発揮するためには、保温効果のよい気密の養生室を準備する必要がある。

### § 3. 蒸気養生に関する既往の研究

#### (1) 使用材料と配合の影響

コンクリートはセメント、骨材および水よりつくられ、必要に応じて混和材料が加えられるが、蒸気養生を行なったコンクリートに対する使用材料、配合などの影響について十分に調査

研究し、その使用材料や配合に最適の蒸気養生条件を採用するか、逆に所定の蒸気養生を行なうためにこれに適した材料あるいは配合を選定できればきわめて好都合である。

## 1) セメントについて

セメントの品質が蒸気養生におよぼす影響については、Reinsdorf<sup>191)</sup>の研究があり、化学成分、粉末度、セッコウ量などを変えたセメントを試製して実験し、蒸気養生に対しては  $C_3S/C_2S$  の比は3以上のセメントのよいこと、 $SO_3$  は3%が長期および短期の強度よりみて望ましいこと、粉末度の高いセメントを用いると養生期間が短縮されることなどを報告している。Keiser<sup>192)</sup>は、蒸気養生に適したセメントを選定する目的で化学成分のことなる9種の試製セメントを用い、 $SO_3$  を2.7%、ブレン比表面積  $3500\text{ cm}^2/\text{g}$  とし、1:3モルタルについて蒸気養生期間をかえて実験し、養生期間の長い場合、 $C_3S$  57%、 $C_2S$  25%、 $C_3A$  2%、 $C_4AF$  14%のセメント、短い場合には  $C_3S$  65%、 $C_2S$  14%、 $C_3A$  8%、 $C_4AF$  11%のセメントがよい結果がえられ、製品用セメントとしては  $C_3S$  60%前後、 $C_3A$  2~4%のものがよいと報告している。Verbeek は、普通セメントと早強セメントを用いて検討し、高温養生を行なう場合にはセッコウの量をますとよい結果がえられると述べている。<sup>181)</sup> また、Nurse、<sup>188)</sup> Sheikin<sup>193)</sup> らはセメントの粉末度をますとセッコウ量をます必要のあることを報告しており、Jirku はセメントの粉末度と  $C_3A$  の量に対して望ましいセッコウ量を与えるつぎの式を示している。<sup>182)</sup>

$$SO_3 = 6.8 \times 10^{-5} \times \text{比表面積} \times C_3A (\%)$$

また、Mironov<sup>194)</sup> の報告によると製品用セメントとしては  $C_3S$  55~65%、 $C_3A$  8%程度で、セメントの粉末度は  $3500 \sim 5000\text{ cm}^2/\text{g}$  のものが初期に高強度をえるのに有利であるとしている。<sup>195)</sup> 平野らは、普通セメントと早強セメントとを用いたコンクリートを蒸気養生し、初期強度発現には早強セメントの使用が有利であることを示している。<sup>196)</sup> 松井らも各種セメントを用いたコンクリートについて実験し、早強セメントがもっとも有利であり、混合セメントは初期強度が低いと述べている。

ソ連では、コンクリート製品用配合に、高炉セメントも実際に使用されており、<sup>197)</sup> Butt<sup>184)</sup> らは蒸気養生の場合、普通セメントに比べて不利ではないと述べている。児玉ら<sup>198)</sup>によると、80℃で6時間密封加熱養生した場合、高炉セメントC種の初期強度の伸びはよかったと報告している。<sup>199)</sup> Royak<sup>199)</sup> らは高炉セメントを用いた場合には養生期間を長くしなければならないと述べている。

初期材令に高強度をえるための製品用セメントとしては、国産のセメントの中では、早強ポルトランドセメントが適していると思われるが、わが国では製品用セメントについて十分に検討されていないのでごく最近開発された超早強ポルトランドセメントを含め、今後研究を進める必要があると思われる。

## 2) 骨材について

骨材はコンクリート容積の70~75%を占めているからコンクリートの品質と密接な関係があり、その最大寸法、粒形、粒度などが単位水量の多少、ワーカビリティなどに影響するが、普通の骨材であればその強度がセメントペーストの強度より大きくしかも不活性であり、蒸気養生に対する影響は問題にされていない。

砕石コンクリートは第1編で述べたように川砂利コンクリートに比べて、一般に単位水量が10~20Kg多くなり、同一セメント量では水セメント比が大となるので、この水量増加の蒸気養生条件に対する影響を考えなければならないが、コンシステンシーが同じでよく締め固められた緻密な構造のコンクリートでは川砂利を用いたものと同じ条件で取り扱われている。最近、コンクリート用砕石として一般のコンクリート工事では石灰石の用いられている例がある。石灰石は反応骨材として知られており、石灰石川砂コンクリートを蒸気養生

200) した高島らの研究によると、川砂利川砂あるいは砕石川砂コンクリートに比べて圧縮強度はほとんど変わらず、引張強度は大となるがこれは骨材とペーストとの化学結合のためと思われる<sup>201)</sup>と述べている。Nurse の実験では、石灰石コンクリートは川砂利コンクリートに比べ圧縮強度は小さいが破壊係数(曲げ強度)は大となっている。なお、オートクレーブ養生ではよい結果がえられていない。<sup>202)</sup>Martin も石灰石コンクリートの研究を行ない、付着のよい骨材を用いるとコンクリートの曲げ強度は改善されると報告している。

構造部材の軽量化の要求、取扱いや運搬に有利なことから人工軽量骨材もコンクリート製品に使用されているが、Hanson<sup>203)</sup>の研究によると、軽量コンクリートの蒸気養生条件は普通コンクリートと大差なく、前養生3~5時間、温度上昇速度20 deg/h、最高養生温度65℃程度がよいと述べている。<sup>204)</sup>長野らのライオナイトを用いたコンクリートの蒸気養生でも、その養生効果は普通コンクリートとほぼ同様であると報告している。また、亀田らは、<sup>205)</sup>人工軽量骨コンクリートを密封抑圧し100℃で養生した場合、悪影響はなく強度増進は顕著であったと述べている。

### 3) 混和材料について

近年、コンクリートの品質を改善するために種類の混和材料が市販されているが、コンクリート製品にはフライアッシュ、A E 剤、減水剤、促進剤などが使用され、蒸気養生に対しては、塩化カルシウムや減水剤が効果的とされている。

ACI Committee 517<sup>181)</sup>の報告では、フライアッシュを用いた場合の水和反応は高温において急激に進むので、70℃以上の高温で養生するのがよく、内割りでは25%までは使用できると述べている。<sup>206)</sup>Stolnikov らは、フライアッシュをセメントに代替する場合、フライアッシュのブレン値が高いほど強度は大であり、とくにセメント35%、スラグ40%にフライアッシュを25%加え、ブレン値が5000 cm<sup>3</sup>/g に微粉砕したものは普通セメントよりよい結果がえられたと報告している。

Balazs<sup>207), 208)</sup>らは、塩化カルシウムはケイ酸カルシウムの水和を促進し、蒸気養生に有効であるが、CaCl<sub>2</sub> が液相の中に残存して鉄筋を腐食する可能性のあることを指摘しており、<sup>209)</sup>Günter は、ひびわれが存在すると鉄筋の腐食が進行しやすいと述べている。<sup>210)</sup>Klieger の実験では、初期材令の圧縮強度の増進に効果があるが、長期材令の曲げ強度は普通コンクリートに比べて低くなることがあると述べている。

Ayapov<sup>211)</sup>は、硬化促進剤をアルカリ系と塩化物系の2グループにわけて実験し、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + CaCl<sub>2</sub> のように両者を併用した場合にもっともよい効果がえられたと述べ、<sup>212)</sup>Sivertsev らも、各種混和剤の硬化促進効果を調べ、混和剤を組み合わせて用いると効果的であると報告している。また、<sup>213)</sup>Butt らは結晶の核、水和セメント、ボゾラン質材料、CaCO<sub>3</sub> なども蒸気養生に対して有効であると述べている。

三浦、杉木らは、<sup>73), 214)</sup>高強度富配合コンクリートにはセメント分散剤(減水剤)の使用が効果的であると報告しており、<sup>215)</sup>児玉らは凝結遅延性を示さない減水剤を用いたコンクリートでは蒸気養生条件はブレンコンクリートと変わらず、強度を高め、結果的にはセメントを10%節約できると報告している。

なお、A E 剤を用いたコンクリートは、一般にブレンコンクリートと同様に取り扱っているが、蒸気養生にはこの連行空気量が影響すると考えられ、この点を明らかにしておく必要がある。

### 4) コンクリートの配合について

コンクリート中の単位水量、水セメント比などの配合は蒸気養生したコンクリートの性質に非常に影響する。<sup>184)</sup>Butt らはコンクリート中の水が多いと蒸気養生の際にコンクリートが破壊される原因になると述べ、また、水セメント比、単位水量を小さくすると養生期間が短

縮できるが、あまり小さすぎると成形方法が制約されるので水セメント比は30%以上にすべきであると報告している。Reinsdorf<sup>182)</sup>によると、加熱の際に受けるコンクリートの熱変形は、その構成要素の値を考えると骨材の熱膨張係数が $5 \sim 15 \times 10^{-6}$ 、セメントペーストが $11 \sim 14 \times 10^{-6}$ 、水はこの約10倍、湿った空気はおおよそ100倍の値を示すので、使用水量が多く自由水、空げきなどの多いコンクリートは、蒸気養生の際にそれだけ硬化体の組織が破壊されやすくなると述べている。Mironov<sup>197)</sup>も加熱の際のコンクリートの熱膨張を少なくするには、配合の点では単位水量、水セメント比を小さくすることが必要であると述べ、Goryainov<sup>216)</sup>らも蒸気養生によるコンクリートの品質低下を防止するには、コンクリート中の空げき量、水量をできるだけ減少する必要があることを指摘している。

Soroker<sup>217)</sup>は、単位セメント量をますことによって初期材令でも高強度がえられるので、これによって養生期間を短縮し、型わくの回転率をあげる方法を検討している。

一般に、コンクリート製品では、低スランプのかた練りコンクリートを使用し、締固め成形を行なって製造しているが、促進養生を行なう場合には成形の許す範囲内でできるだけ単位水量や水セメント比の小さい配合を用いるのが望ましい。

## (2) 蒸気養生条件の影響

高温養生によってセメントの水和を促進し、早期に強度を発現する場合、一般的な蒸気養生のルールを守らなければならない。これを守らないで無理な蒸気養生を行なうと、製品にひびわれ発生、強度発現の不振、耐久性の低下などの損失を与えることになるので、蒸気養生条件の影響は十分に調査しておく必要がある。

### 1) 前養生期間について

一般に、蒸気養生の前に数時間の前養生をとるのがよいとされており、Hanson<sup>218)</sup>の研究によると5±2時間が最適で、前養生期間を長くしても結果的には通気時間を短かくできると報告している。平野<sup>195)</sup>らも前養生期間が長いほど短かい養生期間で高い圧縮強度がえられるとしている。Merritt<sup>219)</sup>らは道路用製品を対象として研究し、コンクリートを打込み後2時間までは38℃以上にあげないほうがよいと述べている。Nurse<sup>220)</sup>らの研究では、前養生は2時間以上とったほうがコンクリートの圧縮強度は高くなると報告しており、また、Reinsdorf<sup>221)</sup>は前養生期間はセメントの終結時間にとるのがよいと述べている。Shideler<sup>222)</sup>らの報告では、前養生は3時間以上がよいとしている。なお、寺本らはペーストの水和熱より研究を進め、強度との関係も検討し、前養生期間は4時間以上が必要と報告している。

Mironov<sup>223)</sup>らは蒸気養生中のコンクリートの変形を測定し、前養生期間を長くするとコンクリートの熱膨張が小さくなることを示している。<sup>182)</sup> Fedorov<sup>223)</sup>も、80℃蒸気養生を行なう前の前養生を15分から24時間に長くすると、熱膨張は3 mm/mから0.2 mm/mに減少すると述べている。

蒸気養生を行なう前の最適の前養生期間については、以上のように一般的な見解はないが、これは前養生が成形温度、使用材料、配合比などに関連する問題であり、この点と関連づけて検討する必要があることを示している。Butt<sup>184)</sup>らも、最適の前養生期間は、セメントの品質、水セメント比、外気温度などによってかわるものであり、そのコンクリートの物理的な硬化状態によって判断し、蒸気養生を開始すべきであると述べている。

### 2) 温度上昇速度について

温度上昇速度は前養生期間ときわめて密接な関係があり、前養生期間が短かいと温度をゆるやかにあげ、長い前養生をとったときには急激な温度上昇が可能である。Reinsdorf<sup>182)</sup>は、温度上昇をきわめてゆるやかに行なえば前養生は必要でないと報告しており、ACI Committee 517<sup>181)</sup>の報告でも、温度上昇速度が11 deg/h以下であれば、前養生期間はとらなくてもよいと述べている。



<sup>184)</sup> Buttらは、加熱期間中にはセメントの水和も進行するが自由水や気ほうの膨張による組織のゆるみも受けるので、温度上昇速度には十分に注意する必要があることを指摘し、段階的加熱方法、すなわち25～40℃まですみやかに温度をあげ、この温度で1.5～2.5時間養生したのち所定の最高温度まで急激に温度をあげる方法が効果的であると述べている。Shideler<sup>221)</sup>らは温度上昇速度は22 deg/h以下を推奨しており、<sup>218)</sup> Hansonによると前養生時間がきわめて短かいのに33～44 deg/hといった急激な温度上昇を行なうと脱型した供試体の側面に水平方向にひびわれを生じたと報告している。ACI Committee 517<sup>187)</sup>のコンクリート製品に関する指針(案)では、温度上昇速度は製品の種類によってことなるが、コンクリート管では11～22 deg/h 一般のプレキャスト部材では22～33 deg/h がよいとしており、一般の製品では前養生を3時間とった場合に上昇速度は22 deg/h 程度が適当とされている。<sup>181)</sup>

<sup>224)</sup> Saulは、打ち込み後4時間まで49℃、6時間までに100℃以上にならなければよい結果がえられ、前養生期間を4時間以上与えるならば急激な加熱をしても悪影響はないとしている。Karapchansky<sup>225)</sup>らは水セメント比の小さいかた練りコンクリートを用いると30～60 deg/h の上昇速度で加熱することができると報告している。<sup>220)</sup> Nurseらは、温度上昇速度を種種にかえ、80℃の最高温度で養生し、上昇速度が低いほど強度は高くなると述べている。なお、軽量コンクリートについてはLewis<sup>226)</sup>の報告があり、前養生3～5時間で、温度上昇速度を10～20 deg/h にとった場合に最大強度がえられたと報告している。

温度上昇をゆるやかにするとそれだけ養生期間が長くなり、脱型時期がのびるので、製品の生産性を低下させることになる。この点、材料や配合の改善によってある程度短くできるが、密封型わく方式を採用し、熱膨張を拘束すると、前養生期間を短縮し、しかも温度上昇を早くすることができる。<sup>182), 184), 227)</sup> とくに、コンクリートを高い圧力で加圧して蒸気養生を行なう場合には、前養生をとらず、しかも100℃といった高温での短時間養生によって高強度がえられている。<sup>228)</sup> なお、<sup>229)</sup> Keiserらは、セメントの発熱、部材の寸法、温度分布などを考慮し、コンクリートの加熱期間を計算で求める方法を示し、上昇速度が20 deg/h 程度だとひびわれ発生の可能性も少なく、凍害抵抗性もよい結果を与えると述べている。

### 3) 最高温度と等温養生期間について

蒸気養生の際の最高温度については長期材令のコンクリートの品質に与える影響を考慮し、JIS製品では65℃程度までとされている。養生温度が高い長期材令の強度発現の劣ることとは、<sup>230)</sup> 高野、<sup>231)</sup> Klieger、<sup>181)</sup> Verbeck、<sup>232)</sup> 横道ら、<sup>233)</sup> Berkovitch、<sup>189)</sup> Idorn、<sup>184)</sup> Buttらによって報告されている。高野は、初めに高温で養生した場合のほうが材令の経過に従い水和の進まなくなる主な理由は、一般にセメントが水和するときセメント粒子の周囲に微細なゲル状物質や結晶などの析出によりある種の半透膜の形成が考えられ、初期温度および養生温度が高いとこの膜が早く生成され、難透過性を増すために以後の水和進行を阻害することが考えられると述べている。また、Idorn は水和温度が上昇するにつれて結晶性のよい反応生成物の径と量が増大するためであるとし、Butt らはこの結晶性の物質がぎっしり詰まるために、未水和粒子の周囲に被膜をつくり水和反応の割合の低下することと練りませ水の蒸発も一つの原因であるとしている。<sup>234)</sup>

<sup>234)</sup> Chamberlin らは、54～94℃の蒸気養生温度の影響について実験し、成形後ただちに蒸気養生した場合、材令1日の強度は74℃、54℃、94℃の順となったが、前養生期間を長くした場合の84℃までの実験では、養生温度が高いほど強度は大となったと報告している。<sup>235)</sup> Higginsonの55～71℃、<sup>218)</sup> Hansonの66～79℃の実験でも、初期材令では養生温度の高いほど強度は大となるという結果をえており、これらの結果にもとづいて、ACI Committee 517の報告では、<sup>181)</sup> 最高温度はJISを上回る66～79℃の範囲を推

奨めている。また、Mironov<sup>197)</sup>は蒸気養生の際の最高温度は70～80℃がよいとし、また<sup>182)</sup>Reinsdorfも80℃以下がよいとしている。平野ら<sup>195)</sup>の50～80℃の養生温度に関する実験でも、材令1日では養生温度の高いほど強度は大となっている。

近年、ソ連、欧州などでは、できるだけ初期に所要の強度をえて型わくの回転率や製造サイクルを早めるためにごくかた練りのコンクリートを用い、<sup>182)</sup>型わくで拘束して80～100℃<sup>236)</sup>といった高い温度での蒸気養生を行なっている例もあり、<sup>184)</sup>工程の短縮には最高温度を高くして養生時間を短かくするのがよいとされている。<sup>237)</sup>篠沢は、蒸気養生温度60℃の場合、0.05～0.2%、80℃では0.2～0.5%、100℃では0.5～1.2%の抑圧力を加えれば従来の条件とことなる急激な加熱による高温での養生が可能であることを報告している。<sup>238)</sup>向井も、<sup>228)</sup>100℃養生では拘束が必要であると述べている。日本プレスコンクリート工業KKの試験報告にみられるように加圧コンクリートでは、できるだけ養生温度を高くしたほうが有利であり、20%で加圧し100℃で養生した場合、普通コンクリートより材令28日で35～40%強度が増大している。

すでに述べたように、高炉セメント、フライアッシュセメントなどの混合セメントでは養生温度を高目にしたほうが養生効果は大となって有利である。<sup>186)</sup><sup>199)</sup><sup>206)</sup>

養生室を所定の最高温度に保って等温養生を行なう期間については、Nurse<sup>220)</sup>らの研究結果によると、養生期間の長いほど初期の強度は高く、温度×時間の関数で示されるが、材令が進むにつれて強度の伸びが悪くなるので、材令28日では差が小となっている。<sup>225)</sup>Karapchanskyらは、等温養生期間を長くとりすぎると、材令28日の強度はむしろ短かいものに比べて低下する傾向があるとしている。

また、Mironov<sup>239)</sup>らの研究では、同じ脱型強度をえるのに最高温度が高いほど養生期間は短くなり、60℃で9時間が80℃で5時間、100℃で4時間となると述べている。なお、<sup>184)</sup>Buttらは4時間以上等温養生を行なっても、長期材令では強度の十分な伸びは期待できないとし、セメントの化学成分、硬化速度などを考慮すべきであると述べている。

蒸気養生温度を高目にして、等温養生期間を短かくし、通気を止めてからの冷却期間を有効に利用する必要があるといえよう。

#### 4) 温度下降速度と冷却期間

所定の等温養生を行なったのちの冷却期間の効果については、まだ十分に研究されていないが、急激な冷却を行なうとコンクリート中の温度勾配が大となり、表面のコンクリートに引張応力を生じる。また、冷却の際は、コンクリート温度が周囲の外気より高いので、コンクリートは脱水を受け、これにより乾燥収縮を生じる。この温度応力と収縮応力のため、コンクリートにひびわれを発生する危険性があるので冷却の際の温度下降速度については注意しなければならない。

<sup>229)</sup>Keiserらは、外気とコンクリートとの温度差が40℃以下だとひびわれはさけられると報告しており、<sup>182)</sup>Reinsdorfは、部材の強度によってことなり、300%以上のコンクリートでは60℃、450%のコンクリートでは75℃の温度差まで許されると述べ、PC製品では温度差が大きいと応力損失の原因になることを指摘している。<sup>187)</sup>ACI Committee 517の蒸気養生に関する指針<sup>(案)</sup>でも熱ショックを避け、徐々に冷却するよう規定している。

<sup>219)</sup>Merrittらは、道路用製品では11 deg/hの下降速度が適当であると報告している。蒸気養生室を気密にしてゆっくりと温度を下げると等温養生と同様の効果が期待されるので、一般の製品では10～15 deg/hの冷却速度が採用されている。<sup>184)</sup>Buttらはコンクリート表面温度と外気温との最大許容差は40～70℃の範囲であり、急激な冷却を行なうと強度の伸びに悪影響を与え、また耐久性をそこなうと述べている。

なお、冷却時に乾燥すると長期強度の伸びに影響するので湿潤状態での冷却についても検

討する必要がある。

#### 5) 後養生について

蒸気養生によって所定の脱型強度をえて型わくを取りはずしても所要の品質がえられるまで、十分に湿潤養生を行なうことが望ましい。郡らは、蒸気養生後空中に放置すると強度が低下するので湿潤養生をできるだけ長くする必要があると述べ、Higginson<sup>235)</sup>も蒸気養生後の湿潤養生の続行によってコンクリートの諸性質が向上することを報告している。

#### (3) 蒸気養生したコンクリートの物理的性質

蒸気養生がコンクリートの諸性質におよぼす影響については、品質判定の基準になっている圧縮強度を中心に多くの研究が行なわれている。しかし、コンクリートの性質は、使用材料と配合、蒸気養生条件、試験条件などによってことなるので、研究者によって多少こととなった結果もえられている。

##### 1) 圧縮強度について、

蒸気養生を行なったコンクリートの圧縮強度については、すでに蒸気養生条件の影響のところで述べたようにNurse<sup>220)</sup>ら、Saul<sup>224)</sup>、Higginson<sup>235)</sup>、Shideler<sup>221)</sup>、Merritt<sup>219)</sup>、Hanson<sup>218)</sup>、Mironov<sup>239)</sup>、Lewis<sup>226)</sup>、平野<sup>195)</sup>、松井<sup>196)</sup>、篠沢<sup>237)</sup>、向井<sup>238)</sup>などのほかPlowman<sup>241)</sup>、渡辺<sup>242)</sup>、岩崎<sup>243)</sup>らなどきわめて多くの研究結果が報告されている。これらの研究結果によると、蒸気養生はコンクリートの初期材令の強度を発現するのにきわめて効果的であるが、高温養生を行なうことによって長期材令への強度増進率が劣り、材令28日では標準養生より低くなることが報告されている。米国の試験結果を中心に既往の研究結果をまとめたACI Committee 517の報告では蒸気養生を行なったコンクリートの材令1日（成形後24時間）の強度は、標準養生のおおよそ60%の値となると述べている。しかし、この割合は研究者によって多少ことになっており、Hanson<sup>218)</sup>の研究では60～65%、Higginson<sup>235)</sup>の71℃までの蒸気養生の結果では標準養生28日強度の50%の値がえられている。また、Kuenning<sup>244)</sup>らのブロックを15時間蒸気養生した場合の結果では50～80%の値が示されている。材令28日における標準養生に対する強度比も同様に研究者によって変動しており、一定の見解を示すことは困難である。

蒸気養生を行なったコンクリートの初期材令の圧縮強度は養生温度の高いほどあるいは養生時間の長いほど大となるので、Saul<sup>224)</sup>、Plowman<sup>245)</sup>、Bergström<sup>241)</sup>などは、コンクリートの初期強度は養生時間と養生温度との積すなわちマチュリチー（度・時）で支配されると報告している。今日、実際の製品工場では、マチュリチーを脱型強度をえるための養生期間を決めるための目安としていることが多い。

ACI Committee 517の報告によると、マチュリチーと脱型時の18時間強度との関係を図示し、マチュリチーが900℃まではマチュリチーの増加とともに強度が直線的に増すが、この値以上になると圧縮強度はほとんど伸びなくなことを示している。

Marosszeki<sup>247)</sup>も300～1000℃・hの範囲で、強度が増大するが、800℃・h以上になるとほぼ一定になると述べている。Lewis<sup>226)</sup>やShchekanenko<sup>248)</sup>は軽量コンクリートの場合も、1日強度はマチュリチーとの関数で示されると報告している。なお、材令が経過するとマチュリチーの大きい場合のほうがコンクリートの強度増進率が低下するので、Nurse<sup>220)</sup>は材令3日以上になるとマチュリチーの考え方は適用できないと述べている。また、Mironov<sup>197)</sup>はセメントの種類、配合などによってマチュリチーと強度との関係はことなるので、この関係による強度推定は信頼度の低いことを指摘しているが、セメントの種類、使用骨材が同じで、しかも配合がほぼ同じであればかなり信頼性のあるものと考えられる。

## 2) 曲げ強度、引張強度および付着強度について

蒸気養生が圧縮強度以外の諸強度におよぼす影響について検討した結果はきわめて少なく今後研究すべき点も多いと考えられる。

Nurse<sup>201)</sup>の実験では、蒸気養生したコンクリートの曲げ強度は、7日間湿潤養生したものよりかなり低くなっている。しかしHigginson<sup>235)</sup>の報告では、蒸気養生したコンクリートの曲げ強度は、蒸気養生しないものとほとんど変わらないと述べている。Seaman<sup>249)</sup>も蒸気養生したコンクリートブロックの曲げ強度を測定しているが一定の傾向はえられていない。Klieger<sup>210)</sup>は49℃までの養生温度が曲げ強度におよぼす影響を調べ、圧縮強度の場合ほど顕著でないと述べている。また、Lewis<sup>226)</sup>は軽量コンクリートの曲げ強度を測定し、圧縮強度に比べてマチュリチーの影響は少ないと報告している。

蒸気養生したコンクリートの引張強度については、Hanson<sup>218)</sup>の研究があり、蒸気養生条件の引張強度におよぼす影響は圧縮強度の場合とほぼ同様であるが、その割合は多少低くなると報告している。また、前養生期間がごく短かく急激な加熱を行なった場合は引張強度は低下したと述べている。

鉄筋とコンクリートとの付着強度に対する蒸気養生の影響に関してはKolner<sup>250)</sup>の研究があり、標準養生の結果と比較し、同じ圧縮強度の場合には蒸気養生のほう付着強度は大であり、付着強度増進には早強セメントの使用が有利であると述べている。

これらの諸強度については、蒸気養生条件の影響をさらに検討する必要があると考える。

## 3) 弾性係数について

蒸気養生を行なったコンクリートの弾性係数は、Hanson<sup>218)</sup>の研究によると初期材令では圧縮強度と同様に増大するが、その影響は圧縮強度より小さい。Pauw<sup>251)</sup>は、弾性係数は圧縮強度の $\frac{1}{2}$ 乗の式で示されると報告している。また、Kuenning<sup>244)</sup>らのコンクリートブロックによる実験では、蒸気養生および標準養生による静弾性係数、動弾性係数などの顕著な差は認められていない。一方、Seaman<sup>249)</sup>は、蒸気養生したコンクリートの弾性係数は普通養生の値に比べて低くなると報告している。Lewis<sup>226)</sup>は軽量コンクリートの動弾性係数を測定し、マチュリチーが増すと、圧縮強度と同様に大となるが、850℃・h以上になるとほぼ一定になったと報告している。

## 4) クリープについて

PC製品ではコンクリートのクリープも重要になる。クリープに対する蒸気養生の影響についてはShideler<sup>221)</sup>の研究があり、66℃で13時間養生したコンクリートのクリープひずみは、標準養生の値より30～50%小さくなっている。蒸気養生によるクリープの減少率は、蒸気養生の際のマチュリチーが大きいほど顕著である。Reinsdorf<sup>182)</sup>は、コンクリートが高強度になるほどクリープの減少率は小さくなると述べている。

## 5) 乾燥収縮について

コンクリート製品では、ジョイントのひびわれ防止の面より、乾燥収縮ひずみはできるだけ小さいものが望ましい。Shideler<sup>221)</sup>の研究によると、66℃で13時間養生した場合、コンクリートの乾燥収縮は30～50%、平均34%低減している。また、Nepper-Christensen<sup>252)</sup>らは、養生温度を高くするほど、また養生期間を長くするほどコンクリートの乾燥収縮は減少することを示している。Lewis<sup>226)</sup>も、蒸気養生の際のマチュリチーを大とするほど乾燥収縮は減少したと報告している。Higginson<sup>235)</sup>は相対湿度10%、温度23℃の条件で乾燥収縮を測定し、蒸気養生したものは標準養生に比べ25～40%減少したと述べている。岩崎<sup>243)</sup>らは、早強セメントと普通セメントを用いたコンクリートを蒸気養生し、平均相対湿度75%で乾燥収縮を求め、標準養生に比べて早強セメントを用いたもので35～40%、普通セメントで10～15%減少した結果をえている。また、Pfeiffer<sup>253)</sup>らは、相対

湿度 65%、温度 20℃ の条件で、蒸気養生したコンクリートの乾燥収縮は標準養生より 20~30% 小となったと報告している。

Seaman<sup>249)</sup>らは、普通および軽量コンクリートの乾燥収縮を求め、蒸気養生によって両者とも 10% 程度の低減であったと述べている。一方、Hanson の実験では、普通コンクリートで平均 33%、軽量コンクリートで平均 18% 低い値が示されている。<sup>181)</sup>

このように、乾燥収縮の結果は、研究者によってかなりことになっているが、これは、使用材料、配合の差異のみならず養生条件、測定条件などの相違のためと考えられ、これらの点も含めてさらに調査する必要があると思われる。

#### 6) 耐久性とくに凍結融解に対する抵抗性について

耐久性もコンクリートの重要な性質の一つであるが、この中でも寒冷地のコンクリート構造物では凍結融解に対する抵抗性いわゆる凍害抵抗性が要求される。

Fedorov<sup>223)</sup>は、蒸気養生したコンクリートの凍害抵抗は標準養生したコンクリートに比べて劣るが、型わくのまま養生することや前養生を長くし温度上昇をゆるやかにすることによって改善されると報告している。Reinsdorf<sup>182)</sup>は、蒸気養生したコンクリートの凍害抵抗は 7 日間湿潤養生を続けたものより小さいと述べている。Keiser<sup>229)</sup>らは、蒸気養生したコンクリートの凍害抵抗は、一般に蒸気養生しないものに比べて低下するが、温度上昇を 20 deg/h 以下とし、徐冷を行なうとかなり改善されることを示している。Skramtaev<sup>254)</sup>らは、凍害抵抗にはコンクリート中の空げきがきわめて影響し、蒸気養生したコンクリートの凍害抵抗を改善するには、水セメント比の小さい空げきの少ないコンクリートにするのがきわめて効果的で、また、加熱はゆるやかに行なうのがよいと報告している。

Higginson<sup>235)</sup>の 38~71℃ の蒸気養生を行なった場合の試験結果によると、7 日間霧養生を行なったコンクリートに比べて、蒸気養生したものは凍害抵抗が劣るが、養生温度はほとんど影響せず、蒸気養生期間を長くしたほうが凍害抵抗は大きくなると述べている。Klieger<sup>255)</sup>は、PC 製品用配合のコンクリートの凍害抵抗を調べ、水セメント比の小さい AE コンクリートにするとコンクリートの凍害抵抗は低下しないこと、前養生期間を長くしたほうがよいこと、塩化カルシウムを用いたプレーンコンクリートは初期強度は大となるが耐久性は劣ることなどを指摘している。Kuenning<sup>244)</sup>らも AE 剤の使用は蒸気養生したコンクリートの耐久性を改善するのにきわめて有効であると述べている。大石<sup>256)</sup>らも、AE コンクリートにするとプレーンコンクリートに比べ凍結融解抵抗性が増大すること、さらに、富配合にしたり、前養生期間を長くすることも効果があると報告している。なお、Royak<sup>199)</sup>らは高炉セメントを用いたコンクリートの凍害抵抗は、普通セメントを用いたものよりすぐれており、塩類に対する抵抗性も大であると報告している。

つぎに、蒸気養生したコンクリートの硫酸塩に対する抵抗性については、Sheikin<sup>193)</sup>らは蒸気養生によって硫酸塩抵抗性は大きくなると述べている。Higginson<sup>235)</sup>の耐酸性の試験でも、湿潤養生 14 日のものに比べ、蒸気養生したコンクリートのほうが耐酸性は大であるという結果がえられている。

コンクリートのすりへりに対する抵抗性についても Higginson<sup>235)</sup>は研究を行なっており、砂の吹付けによる重量減少率ですりへり抵抗を求め、蒸気養生後 7 日間湿潤養生をつづけたものは、28 日間標準養生を行なったコンクリートに比べて、すりへり抵抗は大となったと報告している。

結局、コンクリートの耐久性とくに凍害抵抗性は蒸気養生によってやや低下するが、蒸気養生後の湿潤養生がきわめて重要であり、AE コンクリートを用い蒸気養生後も十分に湿潤養生を行なえば、標準養生と大差ない耐久性がえられると考えられ、この点さらに研究を進める必要があると思われる。

#### 7) 水密性について

水道用の圧力管や水理構造物に用いるコンクリートでは水密性がきわめて重要になる。一般に、コンクリートの水密性を向上するには、水セメント比を小さくすること、富配合コンクリートにすること、十分に締固めを行なうことなどが有効であり、良質のAE剤、減水剤の使用による単位水量の低減、良質のフライアッシュの使用も効果的である。

蒸気養生を行なったコンクリートの水密性についてはGorshkov<sup>257)</sup>がコンクリート管について研究を行っており、型わくのまま養生すること、蒸気養生後も十分に湿潤養生を続けることなどによってよい結果がえられると述べている。Higginson<sup>235)</sup>の実験でも、蒸気養生を行なうとコンクリートの水密性は低下するが、蒸気養生後湿潤養生を続けることによって標準養生に近い結果がえられている。

#### (4) 蒸気養生の設備、装置について

コンクリート製品の蒸気養生を行なった場合、その効果を十分に発揮するためには、熱や蒸気の逃げ難い気密な養生室を準備する必要がある。この蒸気養生の設備は、製品の種類や工程によってことなり、箱型、トンネル型、加熱ベッド、防水布で被覆する方法など種々の形式が使用されており、最近のACI Committee 517の蒸気養生に関する指針<sup>187)</sup>では、各種製品の養生方法に対する指針を示している。実際の工場で蒸気養生を適用した場合には蒸気養生に関するルールを守り、無理のない養生を行なわなければならない。たとえば、100℃に近い高温度で養生する場合には、密閉型わく方式、加圧方式などが必要になる。

蒸気発生装置としては、一般に2000～3000 kg/hの能力のボイラーを使用し、重油を用いて蒸気を発生させ、配管で養生室まで蒸気を送り、ノズルで噴出させて蒸気養生を行なっている。Jarocki<sup>258)</sup>らが報告しているように、加熱の際にもっとも蒸気を使用するので、できるだけ熱が外部に逃げないよう、養生室の断熱効果に配慮が必要である。蒸気を止めて冷却する際にも、製品が急激に冷却されないように十分に注意し、ひびわれ発生の危険性のあるときは温水の散布も考慮する必要がある。なお、養生室の設計は、工場の生産能力に応じて行ない、工程の流れの上で最適の場所に設置しなければならない。

ブロック類、道路用製品などの代表的な養生装置はACI Committee 517の指針<sup>187)</sup>に示されており、熱損失を少なくするため外壁には断熱材を用い、しかもドアはできるだけ気密にするよう指摘している。最近、蒸気を有効に使用する方法としてソ連では、Semenov<sup>259)</sup>らの提案した養生室内の上下で温度勾配をもうけた養生室も用いられている。この場合、100℃まで上昇するので型わくのまま蒸気養生するのが望ましく、型わくについては耐熱的に長期間使用できしかも軽量のものが望ましく今後研究する必要があることが指摘されている。

また、パネルなどの工場生産には、近年、垂直型わくによるたて打ち方式が利用される傾向にある。この方法だと、工場の空間が有効に利用でき、連続した成形ベッドの場合は型わくと型わくとの空間に蒸気あるいは熱風を送って促進養生を行なうことも可能であり、まず1次養生によって脱型可能の強度(40～60 kg/cm<sup>2</sup>)をえたのち、さらに2次養生を行なって所要の強度をえる2段階の硬化方法もBalatjev<sup>260)</sup>らによって試みられている。市岡も<sup>261)</sup>飽和蒸気による前養生を行なったのち、特殊の養生そうを用いて100℃で20時間の高温水沸騰養生を行ない、養生直後に450 kg/cm<sup>2</sup>の目標強度がえられたと報告している。なお、プレハブ住宅用パネルを製造する際にソ連で実用されているベルトコンベア方式を用いて成形、養生を完全に自動化したKozlovの方法もある。<sup>186), 236)</sup>

工場の養生設備に関する研究結果はきわめて少ないが、実際の製品の品質や生産性あるいは省力化とも関連する重要な問題であり、有効な蒸気の利用方法、経済的な蒸気養生の行なえる養生装置などに関して将来さらに研究を進める必要があると思われる。

#### (5) ま と め

コンクリートの蒸気養生効果に対する使用材料、配合などの影響、蒸気養生条件の影響、コンクリートの諸性質、養生設備などに関して既往の研究結果を調査し諸外国の報告を中心に述べた。研究者によって試験結果がかなり相違している場合もあるが、これは使用材料、配合、試験条件、蒸気養生条件などのことなるためと思われる。蒸気養生についてほぼ見解の共通している点をまとめると、つぎのようになる。

- 1) 初期強度発現には  $C_3S / C_2S$  比の高いセメントが有利であり、混和材料の中では塩化カルシウムが蒸気養生に効果的である。
- 2) コンクリートの配合は、とくに単位水量や水セメント比の小さいものが蒸気養生に有利である。
- 3) できるだけ前養生期間を長くとり、ゆるやかに温度上昇し、等温養生ののち徐冷する条件は品質に悪影響を与えない。
- 4) 最高温度は低いほど長期の強度発現に有利であるが、 $80^{\circ}\text{C}$ までの採用は可能であり、さらに高温になると密閉型わくや加圧型わくが必要になる。
- 5) 蒸気養生を行なうと初期材令の強度は高くなるが、材令28日では標準養生強度より低くなる。
- 6) 蒸気養生により乾燥収縮やクリープは低減される。耐久性、水密性などは標準養生より劣るが、蒸気養生後も湿潤養生を続けることによって改善される。

しかしながら、研究者によって影響の程度を示す数値は多少こととなり、また、見解の相違している問題もあり、高温の蒸気養生温度の採用や短時間養生の必要性も生じており、とくに、わが国では蒸気養生に関する研究結果が少なく、今後さらに研究を進める必要があると思われる。

#### § 4. 結 語

本章では、蒸気養生は一般に、前養生、温度上昇、等温、冷却の4つの期間にわけて行なわれ、蒸気養生を行なったコンクリートの品質には、使用材料、配合、養生条件など各種の要因が影響することを既往の研究結果より述べた。

採用する蒸気養生条件は、コンクリート製品の形状、寸法はもとより使用材料、配合などのほか工程によってもことなり、流動的なものと考えられる。したがって、えられた結果も研究者によってまちまちであるが、1日1サイクルのごく一般的な場合の最適養生条件については成形温度、材料、配合などに関連づけて、総合的に研究を進め、再検討を行なう必要があり、現在JIS製品に採用されている蒸気養生条件についても見直す必要があると考えられる。

既往の研究結果の調査や製品工場における問題点より、蒸気養生に関して、つぎのようなテーマについて研究を進める必要があると考える。

1. 蒸気養生に適した製品用セメントの開発
2. 蒸気養生効果を高めるための混和材料の開発
3. 使用材料、配合と最適蒸気養生条件について
4. 蒸気養生条件が圧縮強度以外の諸性質におよぼす影響
5.  $65^{\circ}\text{C}$ を上回る高い養生温度の採用について
6. 即時脱型用の超かた練りコンクリートの蒸気養生
7. 蒸気養生期間の短縮について

なお、これらの問題点のほか、将来さらに高温におけるセメントの水和速度および水和生成物とコンクリートの物理的性質との関連性、促進剤の使用と腐食の防止など化学的立場より蒸気養生に関連する問題を追求する必要があるといえる。

### 第 3 章 使用材料と配合が蒸気養生におよぼす影響

#### § 1. 緒 言

コンクリート製品には、水セメント比の小さいかた練りコンクリートを使用し、とくに土木用製品では高配合で高強度のものを用いる場合が多いが、品質がよくしかも経済的な製品をつくるためには、使用材料や配合が蒸気養生におよぼす影響について研究し、その製品に適した材料や配合を選定するか、逆に使用する材料や配合にあった最適の蒸気養生条件を採用しなければならない。

まず、製品用セメントについては、前章に述べたように Reinsdorf<sup>191)</sup>の研究があるが、わが国では蒸気養生に適したセメントについてはまだ研究されていない。少くとも、現在市販されている各種セメントに対する蒸気養生の影響について検討する必要があるし、ごく最近開発された超早強ポルトランドセメントの製品への利用についても研究しなければならない。とくに、蒸気養生に適した製品用セメントを開発するためには、組成鉱物と高温時の水和過程、物性との関係など化学的立場よりの研究が必要となってくる。

つぎに、かた練りコンクリートにおいてもワーカビリティ、<sup>262)</sup>耐久性、水密性、初期強度などの改善や品質の向上を目的として混和材料が使用される傾向にある。蒸気養生を行なった場合に、混和材料の特性が十分に生かされ、養生効果を高めるものが望ましく、蒸気養生の影響を究明する必要がある。

また、人工軽量骨材コンクリートの蒸気養生については<sup>263)</sup>2, 3の研究があるが、造粒型と非造粒型では粒形、吸水量などに差異があり、この影響についても検討する必要がある。

使用材料、配合などの蒸気養生に対する影響を明らかにすることによって、経済配合や最適養生条件を決めることが可能になると考えられる。したがって、本章では、セメントの組成鉱物と水和過程について既往の研究によって調査したのち、かた練りコンクリートを用いて、各種セメント、各種混和材料、人工軽量骨材、コンクリートの配合などが蒸気養生におよぼす影響を実験研究し、蒸気養生に適したセメント、混和材料などについて考察を行なった。

#### § 2. セメントの品質の影響

##### (1) まえがき

コンクリート製品を工場生産する場合、早期に型わくを取りはずしその使用回数を高めるためには、コンクリートを型わくに打ち込んでから短時間に所要の脱型強度をえなければならない。このため、ポルトランドセメントを用いた一般の製品では蒸気養生を行なっている。この蒸気養生効果を高めるには、蒸気養生に適したセメントを用いるのが有利であり、このためセメントの組成鉱物と水和反応についても考察する必要がある。まずこの点に関し既往の文献により調査を行なった。

わが国に市販されているセメントの種類は、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、白色ポルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュセメント、カラーセメント、アルミナセメントなどでその種類によってそれぞれ特徴がある。また、ごく最近、1日で高強度のえられる超早強ポルトランドセメントも市販されるようになって<sup>263), 264)</sup>いる。したがって、製品に使用するセメントを選定する場合には、蒸気養生の影響を調べ、所要の品質のコンクリートが経済的にえられるものを選定しなければならない。蒸気養生がセメントの品質におよぼす影響については、松井ら<sup>196)</sup>の報告があるが、わが国においては十分に研究されていないので、各種セメントを用いたかた練りコンクリートについて蒸気養生を行ない、セメント種類の影響を検討した。



また、化学成分および粉末度のことなる数種の試製セメントを用いたコンクリートについて、その力学的性質を調べセメントの化学成分、粉末度などの影響を検討した。

最後に、既往の研究と各種セメントの蒸気養生について検討した結果をもとにコンクリート製品に適したセメントについて考察を行なった。

## (2) セメントの組成鉱物と水和について

ポルトランドセメントは原料として石灰石（酸化物として $\text{CaO}$ ）、粘土（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）のほか成分調整用としてケイ石（ $\text{SiO}_2$ ）鉄さいあるいは銅からみ（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）などを用い、原料を乾燥したのち粉砕、混合して回転がまに送り、 $1400\sim 1500^\circ\text{C}$ で焼成したのち冷却するとセメントクリンカとなる。焼成時の高温のためセメントの化学成分は結合し、組成鉱物として存在する。このセメントクリンカに緩結剤であるセッコウ（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）を加え、セメントミルで微粉砕するとセメントとなる。

高炉セメント、フライアッシュセメント、シリカセメントなどは混合セメントと呼ばれるもので、ポルトランドセメントにスラグ、フライアッシュ、シリカなどの混合材を加えたものである。

セメントの組成鉱物とその水和については、古くから研究が進められており、Bogue<sup>265)</sup>をはじめ多くの研究結果が報告されている。<sup>266)</sup>水和過程はきわめて複雑であり、また、電子顕微鏡、X線などを用いて微視的に究明されるので、水和生成物についても研究者により若干意見がことなっており、今後さらに究明されなければならない点も残されているが、竹本<sup>267)</sup>、内川<sup>268)</sup>ら<sup>269)</sup>の研究や1968年10月東京で開催された第5回国際セメント化学シンポジウムにおける諸論文<sup>270)</sup>を参考に<sup>271)</sup>して、セメントの組成鉱物とその水和について考察を行なった。

### 1) クリンカの組成鉱物について

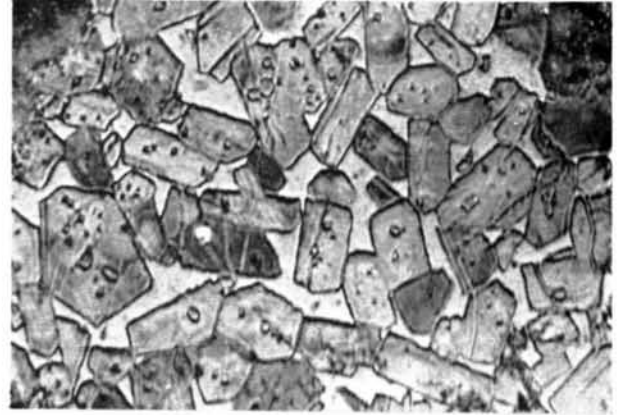
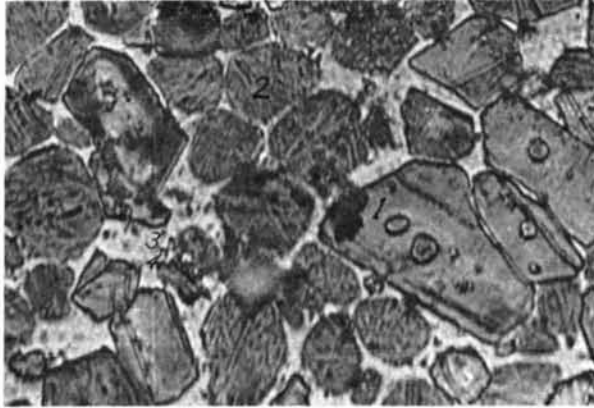
セメントクリンカの主成分は $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ で、これらは結合して組成鉱物として存在する。この組成鉱物については、多くのセメント化学者によって研究され、エーライト相、ビーライト相、アルミン酸3カルシウム相、鉄固溶体相にわけられる。これらは主としてつぎの成分よりなる。

- ① エーライト相……エーライト相はケイ酸3石灰（ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  または  $\text{C}_3\text{S}$ ）が主成分で、他の成分がわずかに固溶している。 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  は水和速度が早く、常温で水和させるとケイ酸カルシウム水和物（トベルモライト）をつくる。板状またはセンイ状の結晶である。
- ② ビーライト相……ケイ酸2石灰（ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  または  $\text{C}_2\text{S}$ ）が主成分の相で円形結晶である。 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  には5つの変態があり結晶格子はことになっている。セメント中では一般に $\beta\text{-C}_2\text{S}$  またはその固溶体である。
- ③ アルミン酸3カルシウム相……アルミン酸3石灰（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  または  $\text{C}_3\text{A}$ ）の固溶体で、 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  と  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  との結晶の間の間げき部分に存在する。矩形状暗間げき質である。
- ④ 鉄固溶体相…… $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  と  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  との間を埋める間げき相で、古くはアルミン酸鉄4石灰（ $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  または  $\text{C}_4\text{AF}$ ）の組成をとると考えられていたが、現在では $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  から仮想上の  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  を結ぶ線上にある固溶体の存在で、 $\text{C}_4\text{AF}$  はその線上の1つであるとされており、 $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$  の組成もみつけられている。

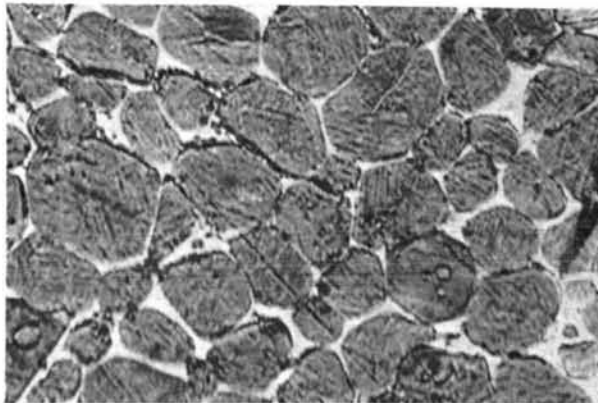
このようなクリンカ主成分であるエーライト相、ビーライト相、アルミン酸3カルシウム相、鉄固溶体相の電子顕微鏡写真を示すと写真-2.3.1(1)~(3)のとおりである。

写真- 2. 3. 1 クリンカ組成鉱物の電子顕微鏡写真

- (1) セメントクリンカの電子顕微鏡写真(×530) (2) セメントクリンカ中のエーライト相(×530)  
 1. エーライト相 2. ビーライト相  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_3\text{S})$   
 3. アルミ酸3カルシウム相(暗間げき相)  
 4. 鉄固溶体相(明間げき相)



- (3) セメントクリンカ中のビーライト相(×530)  
 $\beta - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_2\text{S})$



このほか、苦土( $\text{MgO}$ )、アルカリ( $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ )、遊離石灰( $\text{Free CaO}$ )があり、遊離石灰相、遊離酸化マグネシウム相などが存在する。なお、ポルトランドセメント中の主要組成鉱物を従来用いられてきたBogueの方法<sup>265)</sup>で求めた場合、その概略値を示すと表- 2.3.1のとおりである。

表- 2. 3. 1 各種ポルトランドセメントの組成<sup>272)</sup>

ポルトランドセメントの種類	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ( $\text{C}_3\text{S}$ )	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ( $\text{C}_2\text{S}$ )	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ( $\text{C}_3\text{A}$ )	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ( $\text{C}_4\text{AF}$ )
普通セメント	42~67	18~31	5~14	6~12
中庸熱セメント	20~45	30~56	4~8	6~16
早強セメント	45~70	10~30	7~17	6~10

2) セメントの水和反応について

i) 組成鉱物、ポルトランドセメントの水和反応

セメントに適当量の水を加えて練り混ぜたセメントペーストは、水和反応を起こし、凝

結、硬化の現象を呈して時間の経過とともに強度を発現する。ポルトランドセメントの水和形態やその速度は前述した組成鉱物の割合によって相違するが、これらの水和はつぎのように行なわれる。

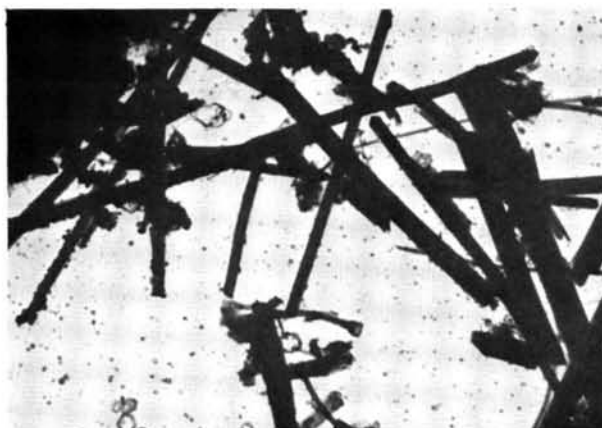
- ①  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  の水和…… $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  は初期の硬化および強度発現をつかさどる。初期の水和速度が大きく、水と反応してトベルモライトのゲルをつくり、水酸化カルシウムを析出する。
- ②  $\beta - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  の水和……長期の水和および強度発現をつかさどる。 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  に比べるとはるかに水和速度が遅い。これらのケイ酸カルシウム水和物すなわちトベルモライトは、通常の水和条件では一般にゲルと呼ばれ、きわめて微細で結晶性のわるいものとされている。
- ③  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  の水和…… $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  は水和速度が大でありしかも水和生成物は比較的結晶度が高くセメントの凝結現象と密接な関係がある。竹本<sup>273)</sup>は、水和温度 $20^\circ\text{C}$ 以下では六方晶系のアルミン酸カルシウム水和物をつくり、 $20^\circ\text{C}$ ではまず $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ が生成し、時間の経過とともに $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ に変化するが、これは水量が多く温度が高くなるほどはやくなると述べている。セッコウの共存下では、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  はセッコウと結合してアルミン酸硫酸カルシウム水和物を生成する。
- ④  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  の水和…… $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  の水和も早く、六方晶系のアルミン酸硫酸カルシウム水和物をつくり、これが次第に等軸系水和物( $\text{C}_3\text{AH}_6$ — $\text{C}_3\text{FH}_6$  固溶体)にかわる。

ポルトランドセメントの水和形態は、上記組成鉱物の水和を示すことになる。セメント中には微量のアルカリが存在するから液相中では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解度が多少低下する。

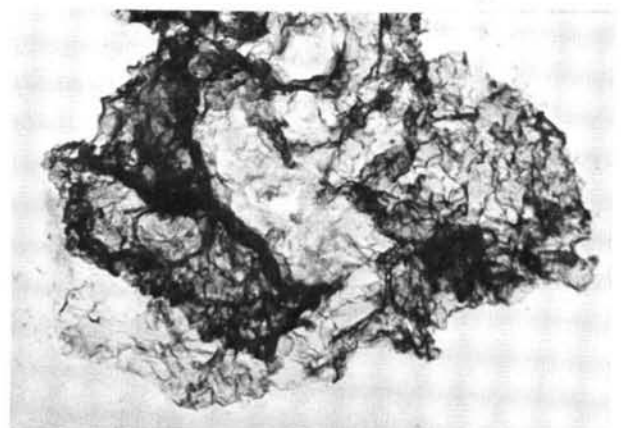
まず、ポルトランドセメントに適当量の水を加えると、セッコウ、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ などが溶液となり $\text{Ca}(\text{OH})_2$ で飽和される。最初に、長針状のアルミン酸3硫酸カルシウム水和物(エトリンジャイトともいう、写真—2.3.2(1)参照)をつくり、のちに六角板状のアルミン酸3硫酸カルシウム水和物とアルミン酸1硫酸カルシウム水和物との固溶体となり、最終的には低硫酸塩型の水和物に移行する。また、 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ は水和過程で若干組織のことなる水和物を生成するが、最終的にはケイ酸カルシウム水和物であるトベルモライト(写真—2.3.2(2)参照)となり、水酸化カルシウムを遊離する。なお、セッコウの存在によってアルミン酸3カルシウムや鉄固溶体相の

写真—2.3.2 セメントの水和生成物の一例

(1) エトリンジャイトの電子顕微鏡写真  
 $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  長針状  
 結晶 ( $\times 13,500$ )



(2) トベルモライトゲルの電子顕微鏡写真  
 $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  層状構造  
 ( $\times 40,000$ )



ごく初期の水和はおさえられるが、1日以後は促進される。

普通ポルトランドセメントの常温での水和量は材令1日で30~40%、28日で60~70%、91日では80~90%と報告されている。<sup>274)</sup>なお、セメントの水和速度には組成成分の割合のほか、セメントの粒径、温度、水量など種類の要因が影響する。

## ii) 混合セメントの水和反応について

高炉セメントは、製鉄所の溶鉱炉で銑鉄をつくるときに生ずるガラス質よりなる水砕スラグ( $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ が主成分)と普通ポルトランドセメントクリンカとを混合粉砕したもので、A種(スラグ30%以下)、B種(30をこえ60%以下)、C種(60をこえ70%以下)の3種類がある。

高炉スラグはそのままでは水和しないが、水酸化カルシウム( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )が存在すると、その潜在水硬性が刺激されて硬化する。 $\text{Kaempfe}^{275)}$ は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が高炉スラグの刺激剤として作用するのは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が粒子の表面において水の透過をはばむ酸性ゲルの生成を防ぎ、ガラス状スラグ中のケイ酸の網状構造を破壊する作用をもつためであると報告している。<sup>276)</sup>山内ら、<sup>277)</sup>田中らも高炉スラグの水和や水硬性について詳細な研究を行っている。高炉セメントの初期の水和過程のうちアルミン酸塩については、ポルトランドセメントの水和と同じであるが、材令がたってからの水和反応はセメントの水和によって生成した水酸化カルシウムと高炉スラグ中のケイ酸との反応によってケイ酸カルシウム水和物を生成する。

フライアッシュセメントは普通ポルトランドセメントに火力発電所の微粉炭燃焼ボイラーから出る廃ガス中から集じん機で捕集したフライアッシュ(主成分は $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ など)を混合したもので、混合量によってA種(10%以下)、B種(10をこえ20%以下)、C種(20をこえ30%以下)がある。

このフライアッシュセメントの水和過程は、ポルトランドセメントの水和物とフライアッシュ中の活性のシリカおよびアルミナとの反応でありいわゆるポズラン反応と呼ばれている。 $\text{Turriziani}^{278)}$ は、これらの反応によってケイ酸カルシウム水和物 $\text{CSH(I)}$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ および $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ 、アルミン酸3硫酸カルシウム水和物などを生成すると述べている。<sup>279)</sup>爾見は、フライアッシュは石灰とセッコウの共存下でもっとも反応しやすく、ケイ酸カルシウム水和物とアルミン酸3硫酸カルシウム水和物を生成することを示している。フライアッシュセメントの初期の水和はポルトランドセメントと同様であるが、時間の経過とともにポズラン反応を生ずる。 $\text{Guillaume}^{280)}$ は、材令14日頃から始まると述べている。なお、フライアッシュならびにフライアッシュセメントの化学的、物理的諸性質については関分が<sup>281)</sup>詳細に報告している。

## iii) セメントの凝結、硬化

セメントに水を加えて練りまぜると水和反応を起こし、各種の水硬性化合物は時間の経過とともに凝結硬化し、次第に強度を発現する。この凝結硬化の機構については $\text{Le Chatelier}^{282)}$ の結晶説と $\text{Michaelis}^{283)}$ のコロイド説とがある。<sup>268), 284)</sup>結晶説は、過飽和溶液から難溶性の水和微結晶が緻密に析出し、結晶の表面エネルギーによる凝集力と付着力とで硬化するという説であり、後者は過飽和溶液から微結晶とゲルを生じて凝結し、水は未水和粒子内に吸収され、さらに水和が進行すると同時にコロイドが乾固し硬化するというものである。<sup>285)</sup> $\text{Bogue}$ は、水和微結晶粒子の内部ひずみによる表面エネルギーによって粒子が凝集し、これが合体して2~3 $\mu$ 程度の粒子になるまで発達し硬化すると説明している。その後、X線回折や電子顕微鏡による研究が進められているが、まだ決定的なセメントの凝結硬化理論は見出されていない。<sup>286)</sup>内川は、セメントペーストの強度発現に対する水和生成物の影響を論じ、比表面積の大きいコロイド状水和生成物であるトベルモライ

トゲルの量が増加し、相互に接着し結合すること、結晶性水和物の微小結晶の発達などにより強度発現の進むことを指摘している。また、最近、小野ら<sup>287)</sup>によってセメント組成鉱物であるアリット、ベリットの性質と水硬性強度との関係も研究され、その結晶鉱物学的性質が影響することを報告している。

セメントの組成鉱物の水和材令と強度との関係は図-2.3.1のとおりである。すなわち、エーライト相が他の組成鉱物より早く反応するので、 $C_3S/C_2S$  比の高いセメントは初期材令で高強度がえられる。ピーライト相の水和速度は遅く、長期にわたって水和が継続する。また、完全に水和した場合を100%として各組成鉱物の水和率と材令との関係を示すと図-2.3.2のとおりである。

図-2.3.1 セメントの組成鉱物と水和速度<sup>288)</sup>

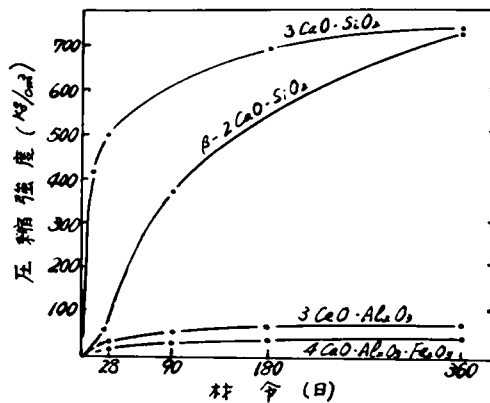
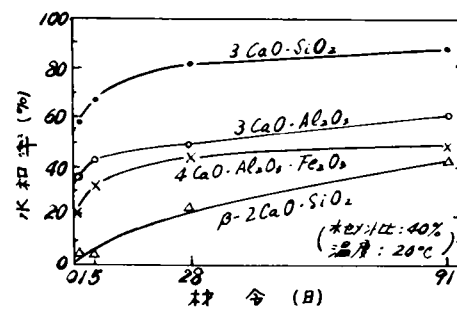


図-2.3.2 組成鉱物の材令と水和率<sup>288)</sup>



固体と液体間の反応は固体の比表面積によって支配される。すなわち、比表面積が増加することによって反応性が高くなり、初期材令で高強度をえることができる。早強ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントよりブレン比表面積がおおよそ $1000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 大きく、最近市販されるようになった超早強ポルトランドセメントでは、セメントメーカーによってことなるが $5200 \sim 6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ のブレン値となっている。なお、セメントの粉末度の高い場合には、セッコウ量を増す必要のあることをSheikin<sup>193)</sup>らが報告している。また、セメントの粉砕はボールミルを用いて乾式で行なうのが一般であるが、高林<sup>289)</sup>は振動ボールミルを用いてセメントペーストの状態で行ない、初期強度の改善を検討し、実用化している。

なお、セメントの水和速度には、化学的混和剤が大きく影響し、塩化カルシウムで代表される硬化促進剤のほか、多くの有機系、無機系の混和剤について研究が進められ、いくつかのものが実用されている。<sup>290)</sup>

### 3) 高温の影響について

セメントの初期材令での水和反応は温度が高くなると促進されることが一般に知られている。コンクリート製品では、成形後高温養生を行ない初期材令での強度発現をはかるのでセメントの水和に対する高温の影響についても調査する必要がある、近年、セメント化学者により研究が行なわれてきた。

Nurseは、 $C_3S$ 、 $C_2S$ などのシリケート化合物の水和反応は温度とともに促進されるが $C_3A$ や $C_4AF$ 系の水和物は高温によってその形が変わることを指摘している。Hansen<sup>291)</sup>によると、セメント中のカルシウムシリケートの水和は常温においてはトベルモライトを生成する方向に進むが、高温においてはダイカルシウムシリケート水和物を生成するとしてお

り、セメントパチルス ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) は高温ではセッコウとトライカルシウムアルミネートに分解すると報告している。Kalousek<sup>292)</sup>らは、50~120℃で養生したセメントペーストについて、X線および電子顕微鏡を用いて研究を行ない、トベルモライト ( $\text{CSH(I)}$ ) のゲル、繊維状の  $\text{CSH(II)}$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  などの生成を認めており、高温ではセメントパチルスは分解し、高硫酸型から低硫酸型の固溶体になり、さらにX相 ( $\text{R}_2\text{O}_3$  および  $\text{SO}_3$  をもった  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  などの結晶質の化合物) があらわれると述べ、とくに70~100℃において急激にX相にかわって行くと報告している。Budnikov<sup>293)</sup>らは、アルミン酸3石灰、アルミン酸鉄4石灰の場合は、温度が高いと結晶が転移し、常温とことなった強度を示すと述べている。近藤<sup>284)</sup>は、高温養生を行なった硬化セメントペーストの諸性質を調べ、セメントペーストの強さは、結晶質の水和物の生成量に比例すると述べている。

最近、Idorn<sup>189)</sup>は50~100℃の高温におけるポルトランドセメントの水和について調査研究し、高温における水和生成物は常温の場合と多少ことなり、カルシウムシリケートのゲルは  $\text{Al}^{+++}$ 、 $\text{Fe}^{+++}$ 、 $\text{SO}_4^{--}$  イオンを含むことが考えられること、高温では結晶性のよいカルシウムシリケート水和物を生成すること、アルミネート、フェライト、サルホアルミネートなどの水和物は少なくなりトリサルフェートとモノサルフェート量との比も小となること、温度の上昇は六方晶系アルミネート水和物の  $\text{C}_3\text{AH}_6$  への転移などを促進しないことなどを報告し、また、水和温度が上昇するにつれて結晶性のよい反応生成物の量と径が増大し、これが蒸気発生したコンクリートにおける長期強度の伸びの低下の一原因になっていると述べている。また、Butt<sup>184)</sup>によると、高温におけるセメントの水和機構は20~25℃の場合とほぼ同様で、蒸気養生では水和生成物中のゲル量が減少し、結晶質の水和物の量がまし、水和物のコンパクトネス（緻密度）は常温養生に比べて10~15% 高くなるとしている。また温度上昇によって水和速度は増大するが、 $\text{C}_3\text{S}$  の水和速度は60℃養生の場合が最高であり、蒸気養生を行なう場合に限りセメントは  $\text{C}_3\text{S}$  を多くしたものがよいと述べている。なお、高温養生するとセメントの空孔の容積が常温養生の場合より増し、これがコンクリートの耐久性に影響すると述べている。寺本<sup>222)</sup>らは、高温では  $\text{C}_3\text{S}$  の水和、 $\text{C}_3\text{A}$  とセッコウとの反応、 $\text{C}_4\text{AF}$  の反応などは促進されるが、 $\text{C}_2\text{S}$  はあまり促進されないこと、初期に生成されたトリサルフェートがあとでモノサルフェートと  $\text{C}_3\text{AH}_6$  に変化すると述べている。Hansen<sup>294)</sup>もセメントモルタルを25~80℃で養生し、45℃以上では  $\text{C}_3\text{S}$  の水和がとくに促進されると述べている。

高温で養生したセメントは最終的には常温で養生したものより強度が低くなる。これは高野<sup>230)</sup>その他の研究者によって指摘されているように高温での水和生成物の緻密な被膜が長期の水和を阻害することが大きな原因と考えられる（前章、p. 120 参照）。Verbeek<sup>295)</sup>はこのほか、高温による初期の水和反応のためにペースト構造中に不均一な水和物を生成し、この微構造の不均一分布が潜在強度の発現をさまたげると述べており、Butt<sup>184)</sup>は水和生成物中の空孔の増加にも原因があるとしている。また竹本、内川<sup>269)</sup>らは、成形温度が高いと液相への未水和セメント粒子の溶解速度、過飽和液相からの水和物の析出速度ははやく、この結晶は微晶であり、初期強度は高くなるが、微晶のため溶出イオンおよび水の拡散に対する抵抗が大きく、以後の水和速度が低減されること、微晶の水和物は構造的に安定しやすく以後低カルシウム高比表面積型の水和物への分裂転移が進みにくいこと、養生初期にできたポーラスな構造が保持されやすいこと、アルミン酸カルシウム水和物が等軸晶系の  $\text{C}_3\text{AH}_6$  に転移するとポーラスになりやすいことなどが長期強度の増進率が低くなる原因であると述べており、養生温度が高いとケイ酸カルシウム水和物は繊維状の形態をとり高カルシウム型のものになりやすく構造は安定化しやすいと述べている。松田<sup>296)</sup>らは水和セメントの比表面積を測定し、高温では低温のものに比べて水和生成物の粒子は小さいことを指摘している。

なお、養生温度と養生期間の影響を考慮して、従来より強度はマチュリチーで示されるという考え方があり、これはごく初期材令の強度には適用できるが、長期材令あるいは最終強度をマチュリチーで示すことはできない。

結局、高温養生によってセメントの組成鉱物である  $C_3S$ 、 $C_2S$ 、 $C_3A$ 、 $C_4AF$  などの水和は促進され、とくに  $C_3S$  の水和反応が顕著で、結晶性のよいカルシウムシリケート水和物をつくる。初期に生成されたアルミン酸カルシウム水和物は、あとでモノサルフェートや等軸晶系の  $C_3AH_6$  に転移する。したがって、成形後の蒸気養生によってコンクリートの硬化は促進され初期材令の強度発現は顕著になるが、初期の水和生成物の緻密な被膜による長期水和の阻害、その微晶の不均一分布と空孔の増大、高温でのシリケート水和物は安定化し低カルシウム型に転移し難くなるなどの理由により、長期材令への強度増進率が低下し、標準養生に比べて長期強度が多少劣ることになる。

### (3) セメントの種類の影響

コンクリート製品には普通ポルトランドセメント（以下普通セメントという）がもっとも広く用いられている。初期材令において高強度を必要とするプレストレストコンクリート製品（以下PC製品という）や脱型を急ぐ製品には早強ポルトランドセメント（以下早強セメントという）が用いられる。高炉セメント、フライアッシュセメントなどの混合セメントは早強セメントや普通セメントに比べて初期材令の強度が低く、所定の脱型強度をえるのに養生期間が長くなるが、脱型を急がない製品、所要強度の低い製品などには十分に使用できると考えられる。また、最近市販されるようになった超早強ポルトランドセメント（以下超早強セメントという）は、ごく初期に高強度がえられ、製品に適していると思われる。

したがって、ここでは蒸気養生を行なうコンクリート製品に適したセメントを選び、また逆にそのセメントに適した蒸気養生条件を採用するため、蒸気養生したコンクリートの品質におよぼすセメントの種類の影響について検討を行なった。<sup>297), 298), 299)</sup>

#### 1) 普通セメントと早強セメントとの比較

##### 1) 実験の概要

表 - 2. 3. 2 に示す普通セメントと早強セメントとを用い蒸気養生の影響を比較検討した。

表 - 2. 3. 2 使用セメントの試験結果

セメント別	化学成分										鉱物組成 (%)				
	ig. loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	total		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	
普通セメント	0.4	0.1	22.3	5.0	3.2	65.3	1.5	1.6	99.4		53.6	23.6	7.8	9.7	
早強セメント	1.0	0.1	21.0	5.0	3.0	65.8	1.3	2.5	99.7		63.2	12.6	8.2	9.1	

セメント別	物理試験		比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			フロー値	曲げ強さ (kg/cm <sup>2</sup> )				圧縮強さ (kg/cm <sup>2</sup> )				安定性
	比 重			w/c (%)	始 発 (時-分)	終 結 (時-分)		1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日	
普通セメント	3.16		3.230	26.8	2-25	3-36	246	—	33.4	50.4	73.4	—	133	233	414	良
早強セメント	3.13		4.200	29.2	1-51	2-48	254	28.0	45.5	61.9	79.3	99	219	323	469	良

粗骨材は静岡県安倍川産で最大寸法 25 mm のもの（比重 = 2.65、吸水量 = 0.9 %）、細骨材は荒川産のあら目のもの（5 ~ 0.6 mm）と栃木県鬼怒川産の微砂（0.6 mm 以下）とを混合したもの（比重 = 2.62、吸水量 = 2.3 %、粗粒率 = 2.78 %）を用いた。

コンクリートの配合はPC製品を含めた広範囲の鉄筋コンクリート製品を対象とし、単位セメント量を 300 Kg、350 Kg および 400 Kg の3種にとり、水セメント比を 37 ~ 50 % の範囲にかえ、スランブは 2 ~ 4 cm のかた練りとした。

20℃または5℃の恒温槽で容量50ℓの可傾式ミキサを用いて練り混ぜ、 $\phi 10 \times 20$  cmの円柱形型わくに詰め、図-2.3.3に示す蒸気養生そうで8~12時間の蒸気養生を行ない、脱型時、7日および28日の圧縮強度を測定した。なお、比較のため標準養生を行なったものについても7日と28日強度を求めた。蒸気養生条件は図-2.3.4に示す6種とした。

図-2.3.3 実験用蒸気養生そう

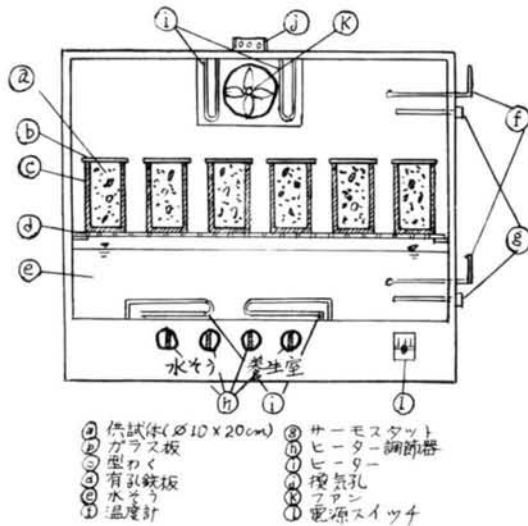
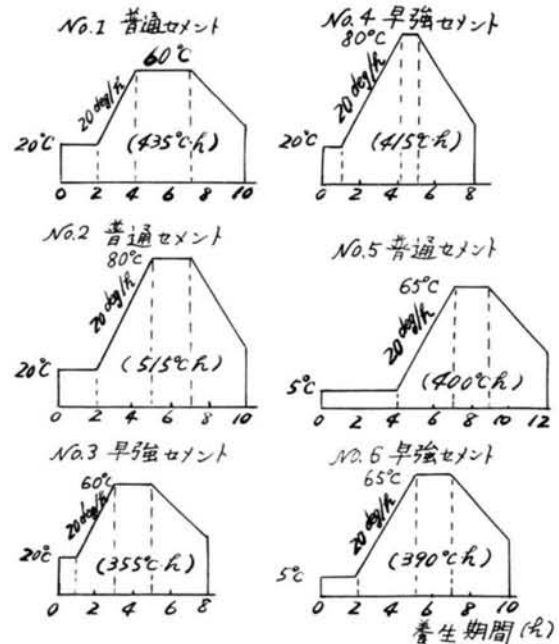


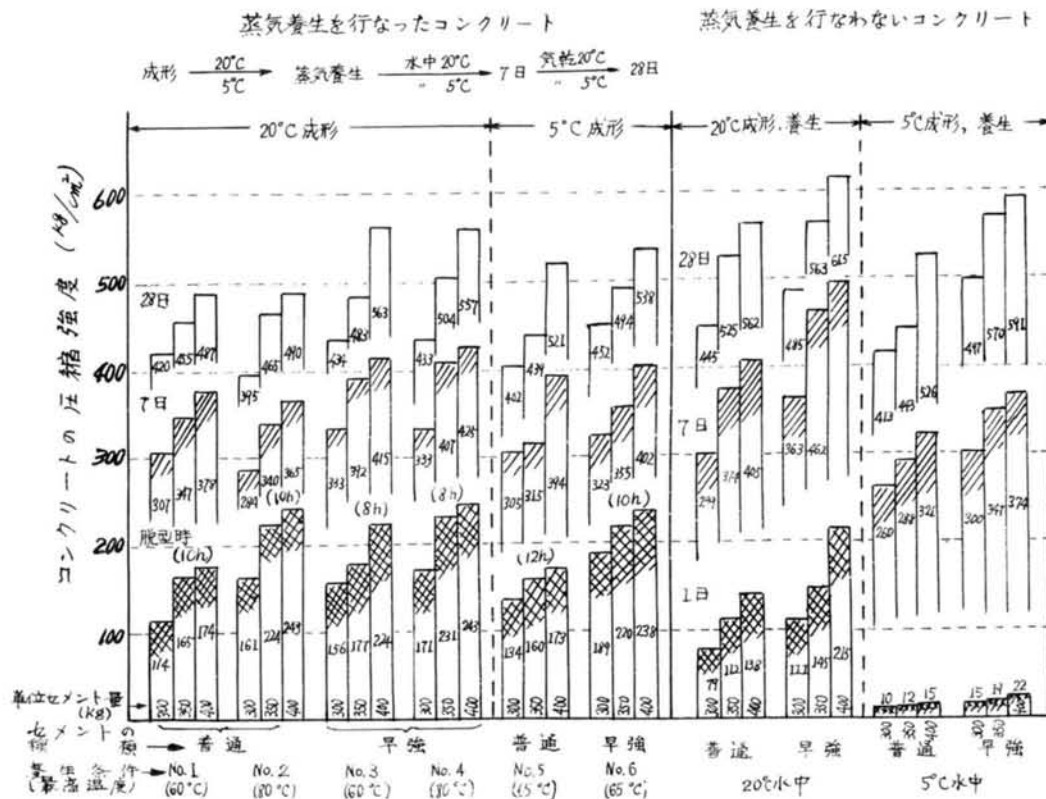
図-2.3.4 コンクリートの蒸気養生条件



## ii) 実験結果とその考察

普通セメントおよび早強セメントを用いたコンクリートを蒸気養生および標準養生した

図-2.3.5 セメントの種類と単位セメント量をかえたブレンコンクリートの圧縮強度





場合の試験結果を示した 図-2.3.5 にみられるように、同一セメント量で同じ成形温度の場合、早強セメントを用いたコンクリートは、普通セメントのものより蒸気養生期間を短縮したにもかかわらず脱型強度は大となっている。すなわち、20℃成形で60℃養生の場合を比べると、普通セメントで単位セメント量350 Kgのコンクリートの脱型強度と早強セメントで300 Kgのもの、あるいは普通セメントで400 Kgのものと早強セメントで350 Kgのものとがほぼ同程度の値を示し、5℃成形では早強セメントで300 Kgの配合のコンクリートが普通セメントの400 Kgの配合のコンクリートの脱型強度より大であり、低温時における養生期間の短縮と脱型時の強度改善に早強セメントの使用がきわめて有利であることを示している。なお、同一強度を目標とすれば、早強セメントでは普通セメントより単位セメント量を約50 Kg節約できるので、セメント1 t当りの価格差がかりに1000円あったとしてもコンクリートのコストはほぼ同じになる。

つぎに、蒸気養生の際の最高温度を高くして80℃養生を行なうと普通セメントを用いたコンクリートの脱型強度は、表-2.3.3のように改善され、早強セメントを用いたもののとの強度差も小となるので、普通セメントの場合はいくぶん養生温度を高くするのが有利である。

表-2.3.3 普通セメントおよび早強セメントの脱型強度の比較

成形温度 (℃)	最高温度 (℃)	普通セメントのコンクリート		早強セメントのコンクリート	
		養生期間(h)	脱型強度(Kg/cm <sup>2</sup> )	養生期間(h)	脱型強度(Kg/cm <sup>2</sup> )
20	60	2+2+3+3	151 (100)	1+2+2+3	186 (123)
20	80	2+3+2+3	209 (100)	1+3+1+3	215 (103)
5	65	4+3+2+3	156 (100)	2+3+2+3	216 (139)

また、早強セメント、普通セメントおよび普通セメントにフライアッシュを内割で20%加えたもの(B種フライアッシュセメントに相当)を使用し、ボール、パイルなどを対象とした単位セメント量450 Kgの富配合で蒸気養生期間を長くし、マチュリチー<sup>298)</sup>1000~1300℃・hとし、最高温度を65、80および95℃で行なった実験によると各種セメントの最適養生条件として表-2.3.4の結果がえられている。すなわち、普通セメントを用いたコンクリートは、常温成形の場合、前養生2~4時間で、最高温度は65~80℃が

表-2.3.4 各種セメントを用いたコンクリートの蒸気養生条件

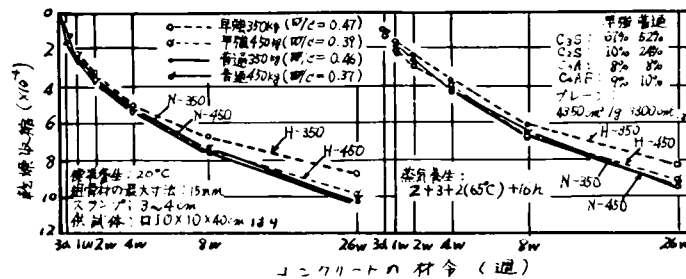
セメントの種類	前養生期間(h)	温度上昇速度(deg/h)	最高温度(℃)
普通セメント	2~4	15~20	65~80
早強セメント	1~2	15~20	55~70
B種フライアッシュセメント	3~5	15~20	70~80

よいが、早強セメントを用いた場合は前養生を短かく1~2時間とし、最高温度は55~70℃とするのがよい。Buttらは、<sup>184)</sup>C<sub>3</sub>Sの水和速度は60℃養生の場合が最高であると報告しており、C<sub>3</sub>S/C<sub>2</sub>S比の高い早強セメントよりを用いたものは、普通セメントの場合より低い最高温度でよい養生効果がえられている。

なお、普通および早強セメントを用いたコンクリートの強度以外の性質については、単位セメント量350 Kgと450 Kgの2種の配合のコンクリートで蒸気養生と標準養生とを行ない、材令7日以後温度20℃、相対湿度50~55%の恒温室に移し乾燥収縮を測定した

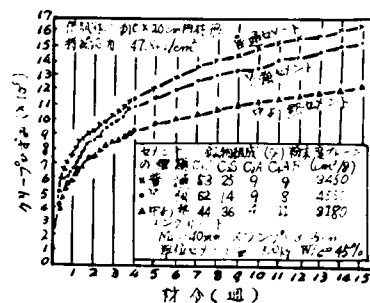
結果を<sup>299)</sup>示した図-2.3.6にみられるように早強セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮は、普通セメントの結果より平均8%低い値となっている。セメント技術協会の収縮委員会で行なったモルタルの乾燥収縮測定結果で<sup>300)</sup>も、早強セメントの収縮が普通セメントの値より小さい。これはReinsdorf<sup>182)</sup>の指摘しているように、セメントの重要な組成成分である $C_3S$ の収縮が $C_2S$ の収縮より小さいためであると考えられる。また、単位セメント量の少ないほど乾燥収縮は小さく、蒸気養生では標準養生より約10%低減している。

図-2.3.6 普通セメントおよび早強セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮の比較



また、最大寸法40mm、単位セメント量320Kg、スランプ3~5cmの普通、早強、中熱の3種セメントを用いたコンクリートについて、 $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体を用い、材令28日まで水中養生後、温度20℃、相対湿度60~70%の条件でクリープひずみを求めた結果<sup>299)</sup>、図-2.3.7に示したように乾燥収縮の場合と同様に普通セメントのコンクリート

図-2.3.7 ことなつた種類のセメントを用いたコンクリートのクリープひずみ



より早強セメントを用いたものはクリープは小となっている。これは、コンクリートのクリープがセメントの化学成分、水和生成物の性質と密接な関係のあることを示すもので、Neville<sup>301)</sup>は $C_3A$ や $C_4AF$ の量が関係するのではないかと述べている。

早強セメントはセメントの水和による発熱量が大きいので寸法の大きい構造物や拘束を受ける部材には温度ひびわれ<sup>302)</sup>の心配があり不向きであるが、早期に高強度がえられしかも養生期間が短縮でき、乾燥収縮、クリープなども小さいのでコンクリート製品とくに高強度を必要とするPC製品用あるいは冬期の製品の製造、型わくの回転率をあげたい場合などにもっとも適したセメントであるといえよう。

## 2) 混合セメントの使用に関する検討<sup>190), 303), 304)</sup>

### i) 高炉セメントについて

高炉セメントはわが国におけるセメント全生産高の約6%を占めており、すでに述べたようにスラグの混合量によってA種、B種、C種の3種があるが、スラグ量が多くなると

初期強度発現が劣るので製品に利用できるのはA種あるいはB種と考えられる。高炉セメントには、長期強度の増進が大きい、水和熱が低い、化学抵抗性が大きく、水密性が大きいなどのすぐれた特徴があり、土木工事の分野ではとくに河川、港湾など水理構造物関係に用いられている。その使用方法については丸安ら<sup>305)</sup>の研究のほか、高炉セメントとそのモルタルコンクリートの諸性質に関してきわめて多くの研究があるが、<sup>306)</sup>製品への利用については遠心力締固めに関する後藤ら<sup>307)</sup>の報告があるのみで、今後さらに研究を進める必要があり、表-2.3.5に示したB種高炉セメントを用い、普通セメントのコンクリートと比較して検討を行なった。

表-2.3.5 使用セメントの物理試験結果

セメントの種類	比重	ブレン比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	凝結時間 W/C (%)	始発時間 (h-m)	終結時間 (h-m)	フロー (mm)	曲げ強さ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )			圧縮強さ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )		
							3日	7日	28日	3日	7日	28日
普通	3.16	3220	265	2-25	3-38	237	32.2	48.7	70.4	124	226	411
B種高炉	3.05	3950	295	4-30	5-50	248	26.8	38.2	66.0	95	165	385

粗骨材は安倍川産で最大寸法 25 mm のもの、細骨材は相模川産で粗粒率が 2.83 のものを用いた。コンクリートは道路用製品を対象とした表-2.3.6に示す配合を用いた。なお、混和剤としてポズリス No. 5 (セメント量に対し 0.5%)、塩化カルシウム (セメント量に対し 1%) を添加した配合も用いた。

表-2.3.6 使用したコンクリートの示方配合

セメントの種類	コンクリートの種類	最大寸法 (mm)	目標 スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				混和剤 使用量 (%)
							W	C	S	G	
普通	ブレン	25	4±1	—	44.4	42	160	360	782	1092	—
	ポズリス No. 5	25	4±1	2.0	38.8	40	140	360	750	1138	1800
	塩化カルシウム	25	4±1	—	44.4	42	160	360	782	1092	3600
B種高炉	ブレン	25	4±1	—	45.8	42	165	360	772	1079	—
	ポズリス No. 5	25	4±1	2.0	40.3	40	145	360	741	1134	1800
	塩化カルシウム	25	4±1	—	45.8	42	165	360	772	1079	3600

コンクリートは  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  の円柱形型わくに詰め、標準養生および蒸気養生を行なった。蒸気養生条件は、前養生期間を 0、2 および 3 時間の 3 種にとり、温度上昇 + 等温 + 冷却期間 = 3 + 2 + 3 時間とし、最高温度は 65℃ (15 deg/h の上昇速度) と 80℃ (20 deg/h) との 2 種とした。脱型時および所定材令で求めたコンクリートの圧縮強度試験結果を表-2.3.7 (1) および (2) に示す。なお標準養生の場合は材令 28 日の曲げ強度と引張強度も試験した。

標準養生した場合、高炉セメントを用いたコンクリートの圧縮強度は普通セメントを用いたものの 80~95% であるが、蒸気養生を行なったものの脱型時 (8~11 時間) の強度は普通セメントに比べてかなり低く前養生 3 時間で 80℃ 養生の場合でも 56% の値となっている。しかし、 $103 \text{ kg}/\text{cm}^2$  の圧縮強度がえられており製品によっては十分に使用しうられると思われる。養生温度の低い 65℃ の場合は、 $62 \text{ kg}/\text{cm}^2$  の値であり、この温度では促進剤を使用するか養生期間を長くする必要がある。Royak<sup>199)</sup>らも、養生温度を高くするとよ

い結果がえられると述べており、高炉セメントを用いる場合には養生温度を高くする必要

表一 2.3.7 高炉セメントと普通セメントを用いたコンクリートの強度試験結果  
(1)標準養生を行なった場合

セメントの種類	コンクリートの種類	圧縮強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )				引張強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	曲げ強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
		1日	3日	7日	28日	28日	28日
普通セメント	ブ レ ー ン	61	224	358	486	34.0	62.5
	ホゾリス $\times$ 5	100	304	401	453	38.6	58.3
	塩化カルシウム	152	253	402	487	—	—
B 種 高 炉 セ メ ン ト	ブ ー ン	39	146	222	432	33.4	60.3
	ホゾリス $\times$ 5	41	186	245	461	34.3	59.2
	塩化カルシウム	74	160	242	378	—	—

(2)蒸気養生を行なった場合

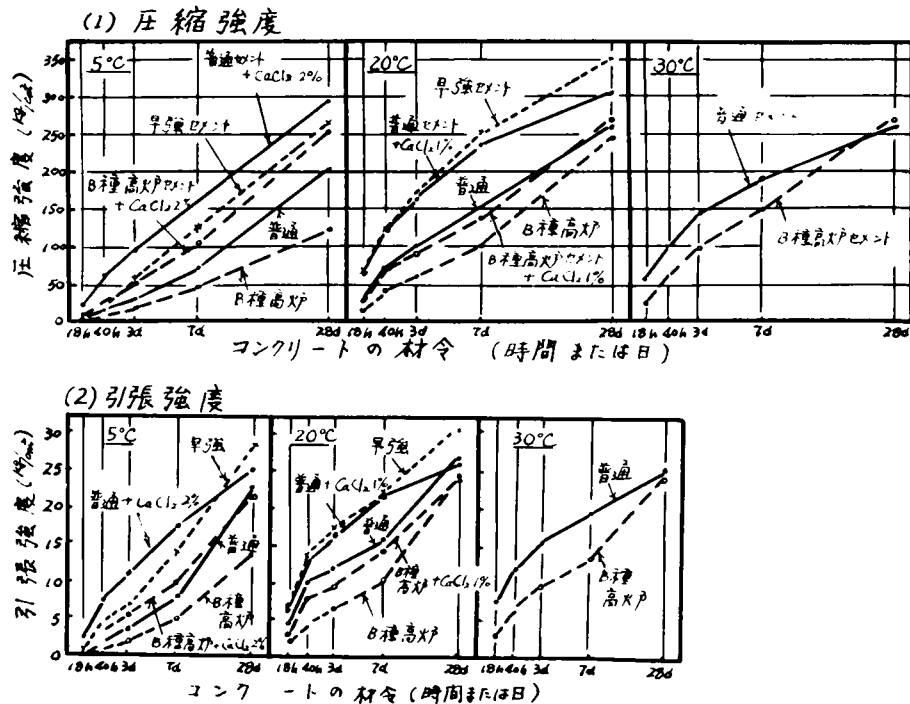
セメントの種類	コンクリートの種類	最高温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	前養生期間 (h)	圧 縮 強 度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )			
				8~11時間	1日	7日	28日
普通セメント	ブ レ ー ン	80	3	185	237	332	457
	塩化カルシウム	80	3	217	268	367	473
B 種 高 炉 セ メ ン ト	ブ レ ー ン	65	0	57	84	187	319
		65	2	60	91	194	330
		65	3	69	94	195	348
	ブ レ ー ン	80	0	88	109	171	285
		80	2	97	121	218	315
		80	3	103	129	220	343
		80	3	166	185	293	390
	塩化カルシウム	80	3	166	185	293	390

がある。塩化カルシウムを用いると、80℃養生の場合、普通セメントのブレーションコンクリートに近い脱型強度がえられている。鈴木も、高炉セメントの初期強度改善には塩化カルシウムの使用が有効であると述べている。

なお、普通、早強およびB種高炉セメントを用い、粗骨材の最大寸法40mm、スランブ9~10cmの土木用コンクリートについて外気温を考慮し5℃、20℃および30℃で成形し、その温度でそれぞれ養生し圧縮強度および引張強度を調べた結果、図一2.3.8(1)および(2)にみられるように、低温度では高炉セメントの初期強度発現が劣り、初期材令では普通セメントを用いたコンクリートの約 $\frac{1}{2}$ となっているが、5℃養生の場合塩化カルシウムを2%加えると普通セメントを用いたもの以上の強度がえられ、20℃では1%加えると普通セメントの場合とほぼ同じ強度がえられている。

結局、高炉セメントを用いる場合には蒸気養生温度を高くするか、促進剤の添加が脱型強度の改善に効果的である。

図 - 2. 3. 8 5℃、20℃および30℃で成形、養生した各種セメントを用いた  
コンクリートの強度と塩化カルシウム添加の影響



## II) フライアッシュセメントについて

フライアッシュセメントの生産高は高炉セメントと同様に約6%を占め、その代替率によってA種、B種 およびC種がある。工事現場では、混和材として練り混ぜの際にセメントの10~30%を代替して用いることもある。フライアッシュセメントを用いたコンクリートの特徴としては、長期強度が大きい、水和熱が低い、化学抵抗性が大きい、水密性がよい、ワーカビリティがよいなどで、ほぼ高炉セメントと類似した長所があり、土木方面とくに河川、港湾、海岸、ダムなどの構造物に用いられている例が多く、コンクリートの品質や使用方法についても国分<sup>281)</sup>、吉越<sup>309)</sup>、山崎<sup>310)</sup>をはじめ多くの研究結果が報告されている<sup>311), 312)</sup>。

フライアッシュセメントは普通セメントに比べて初期材令における強度発現が劣るので、コンクリート製品に対してはほとんど使用されておらず、また製品への利用に関する研究結果も、佐々木<sup>313)</sup>がフライアッシュセメントを用いた遠心力コンクリートについて検討しているに過ぎない。しかし、製品のはだ面を改善したり、細骨材の粒度の粗いのを補なうためフライアッシュを混和材として用い、セメントに対して外割りで10%程度加えている例がある。フライアッシュあるいはフライアッシュセメントを用いたコンクリートは長期強度が大となり、水密性が向上するので、湿潤状態で使用される製品では、脱型強度にさしつかえなければ、A種またはB種フライアッシュセメントの使用が可能であると思われる<sup>314)</sup>。

また、間知ブロックのように成形後ただちに型枠を取りはずすいわゆる即時脱型製品では、強度より締固めの際の充てん率が重要になる。実際に、土木用ブロックを製造している工場で、普通セメント、B種フライアッシュセメント、B種高炉セメントを用いて、即時脱型を行ない、間知ブロックの上下面をイオウキャッピングし写真-2.3.3のように製品の強度を試験した結果を<sup>304)</sup>示した表-2.3.8にみられるように、セメントの品質の影響は小さくなる傾向がある。

写真-2.3.3 間知ブロックの圧縮強度試験

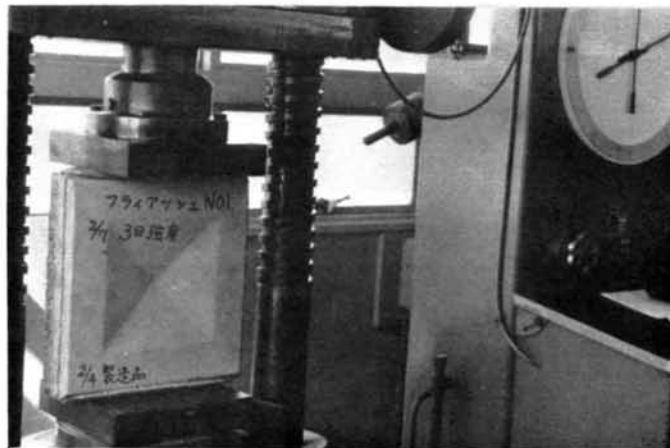


表-2.3.8 3種セメントを用いた間知ブロックの圧縮強度試験結果

セメントの 種類	蒸 気 養 生								屋 外 養 生	
	1 日		3 日		7 日		28 日		28 日	
	重量 (kg)	強度 (kg/cm <sup>2</sup> )(psi)	重量 (kg)	強度 (kg/cm <sup>2</sup> )(psi)	重量 (kg)	強度 (kg/cm <sup>2</sup> )(psi)	重量 (kg)	強度 (kg/cm <sup>2</sup> )(psi)	重量 (kg)	強度 (kg/cm <sup>2</sup> )(psi)
普通セメント	30.09	172 (100)	29.29	179 (100)	29.45	233 (100)	29.88	303 (100)	29.55	258 (100)
B種高炉 セメント	29.97	172 (100)	30.09	196 (109)	29.83	240 (103)	30.15	338 (111)	29.67	255 (99)
B種フライ アッシュセメント	29.50	159 (92)	29.59	191 (107)	29.80	238 (102)	29.52	292 (96)	29.85	233 (90)

なお、フライアッシュを用いたコンクリートに対する蒸気養生の影響については次節の混和材料の項で述べる。

結局、型わく養生製品に混合セメントを用いると初期材令の強度が低くなるので、早期脱型を行なう場合には不利であり、マチュリチーを大きくしたり、促進剤との併用を考慮する必要があるといえる。

### 3) 超早強セメントの使用について<sup>179)</sup>

#### i) 実験の概要

超早強セメントを用いると初期材令に高強度がえられ、製品を早く脱型し、使用することが可能であり、今後工場製品にも使用されることが予想される。したがって、スランプ5cm前後の製品用配合のコンクリートを用い、初期強度、蒸気養生の影響などについて基礎実験を行なった。

セメントはメーカーのことなる2種の超早強セメントのほか早強セメントと普通セメントとを用いた。化学分析結果および物理試験成績は表-2.3.9のとおりである。骨材は、吉野川産で最大寸法20mmの川砂利と、粗粒率が2.84の川砂を用いた。コンクリートは表-2.3.10に示す単位セメント量300kgの配合で、ブレンコンクリートとした。

表-2.3.9 使用セメントの試験成績

化学分析 セメント別	ig.loss (%)	insol (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	total (%)	鉱物組成 (%)			
										C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
超早強セメント(A)	0.9	0.1	19.3	5.2	2.7	64.7	1.1	3.4	97.4	68	4	9	8
超早強セメント(B)	0.9	0.1	19.7	5.1	2.7	64.7	2.0	2.6	98.2	68	5	9	8
早強 # (H)	0.8	0.2	21.3	4.7	2.8	65.6	1.4	2.3	99.1	61	15	8	9
普通 # (N)	0.6	0.1	22.3	5.3	3.1	65.1	1.2	1.8	99.5	50	26	9	9

物理的性質 セメント別	比重	ブレン 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結時間			曲げ強さ (kg/cm <sup>2</sup> )				圧縮強さ (kg/cm <sup>2</sup> )			
			水量(%)	始発		1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
				時間	時間								
超早強セメント(A)	3.14	5200	30.8	1-50	3-00	42.1	53.8	65.6	70.5	200	341	404	455
超早強 # (B)	3.14	5950	30.3	1-15	1-55	51.9	65.1	75.3	82.1	220	311	372	480
早強 # (H)	3.14	4030	28.9	2-29	3-32	26.1	51.9	64.7	77.2	95	238	346	474
普通 # (N)	3.15	3190	28.2	2-30	3-38	—	33.2	47.3	69.2	—	129	229	411

表-2.3.10 使用したコンクリートの配合

使用セメント	配合%	最大寸法 (mm)	スランプ (mm)	W/C (%)	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				成形温度 (°C)
						W	C	S	G	
超早強セメント(A)	A-5	20	5±1	56.3	40	169	300	750	1120	11.0
普通セメント(N)	N-5	20	5±1	53.3	43	160	300	817	1080	
超早強セメント(A)	A-5	20	5±1	59.3	40	178	300	740	1106	
超早強セメント(B)	B-5	20	5±1	58.3	40	175	300	744	1110	22.5
早強セメント(H)	H-5	20	5±1	57.7	41	173	300	764	1140	

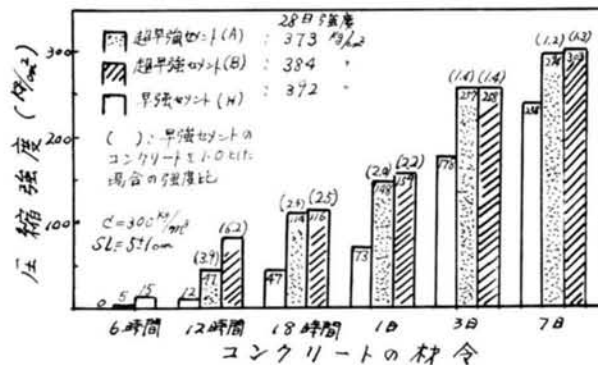
強制練りミキサを用いてモルタルで1分、粗骨材を投入してさらに1分練りませ、スランプおよび空気量の試験を行なったのち10×20cmの円柱形型わくに一層に詰め、振動数5000vpm、振幅0.8mm、振動時間30秒の条件で振動台を用いて締固めを行なった。標準養生の場合は、締固めを行なったのちただちに20°C±1degの恒温室に移し、翌日脱型し所定材令まで水中養生を行なった。蒸気養生を行なう場合は、締め固めたのち蒸気養生そうに入れ、前養生+温度上昇+等温+冷却期間=1+2(20deg/h)+1(60°C)+1.5hの条件で養生を行なったのち水中養生に移した。なお、初期材令の強度はセッコウキャッピングを行ない、12および18時間の材令で測定した。また、圧縮強度試験の前にヤング率測定器を用い動弾性係数も求めた。

## ii) 実験結果とその考察

### ① 初期材令の強度について

2種の超早強セメントA、Bおよび早強セメントを用いたコンクリートの6時間から7日までの初期材令の強度を示した図-2.3.9にみられるように超早強セメントを用いたコンクリートは早強セメントを用いたものに比べて材令1日までの強度が著しく大きく、材令1日で約150%の値がえられており、これは早強セメントの約2倍の値であり、外気温が高ければ製品によつては蒸気養生が省略できると考えられる。

図-2.3.9 超早強セメントと早強セメントを用いたコンクリートの初期材令における圧縮強度の比較



超早強セメントAとBとを比較すると、表-2.3.9に示したように粉末度がかなり相違しているためごく初期はBのほうが大きい、材令18時間から7日の強度はほぼ同程度となつている。なお、早強セメントは材令3日、7日となるにつれて強度増進率は高くなり、材令28日では超早強セメントよりむしろ大となる傾向がある。

### ② 蒸気養生の影響について

超早強セメントAおよび普通セメントを用い蒸気養生および標準養生した材令91日までの圧縮強度試験結果を図-2.3.10に示す。超早強セメントを用いたコンクリートを短時間の蒸気養生した場合、養生終了後、6時間で152%。材令1日で287%の高強度がえられている。普通セメントのコンクリートではそれぞれ62%と168%となっており、養生期間の短縮に超早強セメントの使用はきわめて有利である。また、超早強セメントのコンクリートを蒸気養生すると材令3日で普通セメントを用いた場合の28日強度がえられている。長期材令への強度増進率は劣っているが、アルミナセメントコンクリートのように強度低下の現象はみられない。

なお、標準養生を行なった場合も超早強セメントは材令3日までの強度発現が顕著で、材令1日でおおよそ150%、3日で300%程度の値がえられており、型わくの回転を急がぬ場合や所要の脱型強度によっては蒸気養生を行なう必要がなくなると考えられる。なお、材令91日では普通セメントの強度がわずかに高くなる傾向がある。



図-2.3.10 超早強セメントと普通セメントを用いたコンクリートの養生方法と圧縮強度

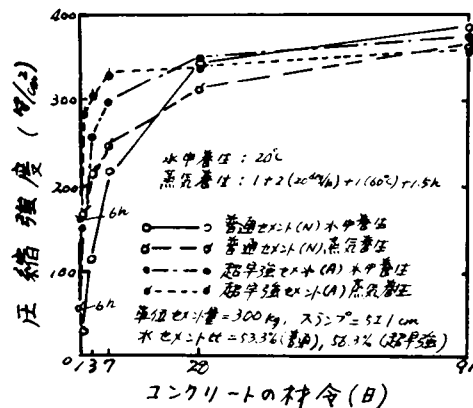
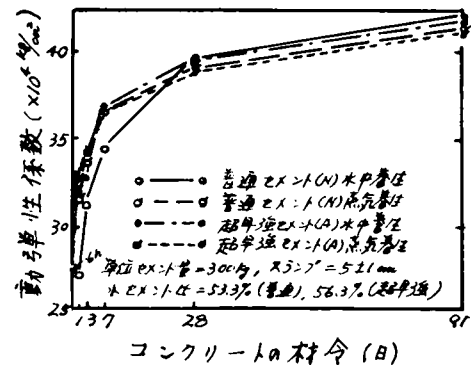


図-2.3.11 超早強セメントと普通セメントを用いたコンクリートの動弾性係数



また、図-2.3.11 に示したようにコンクリートの動弾性係数も圧縮強度とほぼ同様の傾向を示している。

結局、超早強セメントを用いたコンクリートの初期材令の強度発現はきわめて顕著であり、単位セメント量  $300 \text{ Kg}$  の配合で、材令 1 日で早強セメントを用いたコンクリートの約 2 倍の  $150 \text{ Kg/cm}^2$  の圧縮強度がえられる。また、短時間の蒸気養生で脱型時の 6 時間でおおよそ  $150 \text{ Kg/cm}^2$ 、材令 1 日で  $300 \text{ Kg/cm}^2$  程度の強度を示しており、早期に高強度をえるのにきわめて効果的なセメントであることを示している。

以上 1)~3) にわたり各種セメントに対する蒸気養生の影響を調べた結果、早強セメントを用いると同一強度をえるための単位セメント量が普通セメントに比べて少なくなり、蒸気養生期間が短縮でき、しかもクリープ、乾燥収縮なども低減でき、製品用とくに高配合のコンクリートに有利である。また、普通セメントを使用する場合には、蒸気養生の際の最高温度を  $70 \sim 80^\circ\text{C}$  程度に高くしたほうが  $65^\circ\text{C}$  養生に比べて蒸気養生効果は大となる。混合セメントを用いる場合には、初期材令の強度発現が普通セメントに比べて劣るので、混合材の配合比の少ない A 種を用いるか、脱型を急ぐ製品では品質に悪影響がなければ促進剤を添加する必要がある。超早強セメントは短時間の蒸気養生で高強度がえられ、経済性の問題はあがるが、型わくの回転率をあげ、早期出荷にはきわめて有利であると考えられる。

なお、コンクリートの硬化促進は、外気温、成形温度などとも関連する問題であり、季節的なセメントの種類の使いわけについても十分に考慮する必要がある。

#### (4) セメントの化学成分がコンクリートの性質におよぼす影響

同じ種類のセメントでもその化学成分や粉末度の相違によってコンクリートの性質はことなってくると考えられるが、この点に関して検討した結果はほとんどみられない。したがって、一般に広く用いられている普通セメントを対象とし、その品質向上を目的として、化学成分を 3 種、粉末度をそれぞれ 2 種にかえた計 6 種のセメントをセメント工場における実際の回転がまを用いて試製し、コンクリートの力学的性質におよぼす影響を調べた。

##### 1) 実験の概要

工場で試製したセメントの化学成分を表-2.3.11 に示す。記号 S 2 が標準型の普通セメントで、S 5 はケイ酸率 (SM) をやや大きく、S 9 は逆にやや小さくしたものである。A は B よりもセメントの粉末度をブレン比表面積で  $230 \sim 250 \text{ cm}^2/\text{g}$  高くしたものである。またこれらのセメントの物理試験結果は表-2.3.12 のとおりである。

表-2.3.1.1 工場で試製したセメントの化学成分

セメント の種 類		化 学 分 析 結 果 ( % )									諸 係 数				組 成 鉱 物					
		ig. loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Total	S	M	A	I	M	H	M	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
S. 5	A	0.89	0.18	22.68	4.74	3.26	65.29	1.38	1.43	99.97	2.84	4.78	1.45	2.10	50.52	27.1	6.9	10.0		
	B	0.86	0.17	22.73	4.73	3.29	65.28	1.35	1.47	100.00	2.83	4.81	1.44	2.09	50.22	27.3	6.9	10.0		
S. 9	A	0.89	0.14	22.54	4.99	3.55	64.73	1.47	1.31	99.78	2.64	4.52	1.41	2.05	47.8	28.6	7.2	10.9		
	B	0.82	0.14	22.62	4.95	3.57	64.73	1.48	1.32	99.78	2.65	4.57	1.39	2.05	47.1	29.4	7.2	10.9		
S. 2	A	0.94	0.16	22.30	4.93	3.25	65.45	1.28	1.52	100.03	2.73	4.52	1.52	2.11	51.1	25.5	7.4	10.0		
	B	0.88	0.13	22.35	4.91	3.27	65.45	1.30	1.43	99.89	2.73	4.55	1.50	2.11	51.1	25.9	7.4	10.0		

粗骨材は山口県岩国川産砂利（比重＝2.63、吸水量＝1.3％）、細骨材は山口県秋穂産の粗砂と小野田微砂を7：3の割合で混合したもの（比重＝2.58、吸水量＝1.6％、粗粒率＝2.75）を用いた。コンクリートの配合は、最大寸法40 mmでスランブ4 cmを目標とした土木

表-2.3.1.2 試製セメントの物理試験結果

セメント の 種 類		比 重	88μ 残分 (%)	ブレン 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結 時 間			フロ ー 一 値	曲 げ 強 さ (kg/cm <sup>2</sup> )					圧 縮 強 さ (kg/cm <sup>2</sup> )				
					W/C (%)	始 発 (h-m)	終 結 (h-m)		1 日	3 日	7 日	28 日	91 日	1 日	3 日	7 日	28 日	91 日
S. 5	A	3.18	1.5	3230	24.5	2-56	3-53	261	14.4	35.5	45.0	72.3	78.1	46	131	212	374	488
	B	3.17	2.2	2990	24.3	3-02	4-05	252	15.0	33.7	43.0	66.9	77.4	45	130	212	369	479
S. 9	A	3.17	1.8	3250	24.5	2-56	3-56	252	14.3	33.3	46.1	72.1	81.1	38	136	230	408	495
	B	3.17	2.4	3020	24.3	3-30	4-27	253	12.9	31.9	42.5	70.5	79.3	36	125	220	381	461
S. 2	A	3.17	2.0	3310	24.8	3-09	4-09	252	13.8	32.4	48.4	70.4	77.4	41	135	231	405	466
	B	3.17	2.3	3060	24.5	3-40	4-45	253	12.3	30.1	46.2	71.8	76.3	35	129	232	415	474

用で、A E剤としてピンソル溶液を用いた。なお、クリーブ試験は単位セメント量400kgの富配合とし、粗骨材の最大寸法は20 mmとした。使用したコンクリートの示方配合は表-2.3.1.3のとおりである。

表-2.3.1.3 実験に用いたコンクリートの配合

コンクリートの 種 類	最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				単位A E剤量 (cc)
						W	C	S	G	
かた練り用	40	4±1	4.5±0.5	4.5	3.5	126	280	673	1273	1960
クリーブ試験用	20	10±1	—	4.2	4.6	168	400	825	989	—

コンクリートの練りまぜには容量30ℓの可傾式ミキサを用い、練りまぜ直後、コンクリートのスランブおよび空気量を測定し、さらにブリージング試験も行なった。

コンクリートはφ15×30 cmの円柱形型わくに詰め、材令7、28、91日および6カ月で圧縮強度および引張強度試験を行なった。また、動弾性係数、乾燥収縮、クリーブなども測定した。

## 2) 実験結果とその考察

### i) まだ固まらないコンクリートの性質

各種セメントを用いたまだ固まらないコンクリートの試験結果を表-2.3.1.4に示す。

かた練りコンクリートでは、セメントの化学成分や粉末度によるスランブや空気量の相違

表-2.3.14 まだ固まらないコンクリートの試験結果

セメントの種類		スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリージング量 (cc/cm <sup>3</sup> )	ブリージング率 (%)
S 5	A	4.0	4.8	0.12	3.8
	B	4.0	4.9	0.13	4.0
S 5	A	4.0	5.0	0.12	3.8
	B	4.2	5.0	0.13	4.2
S 5	A	3.0	4.5	0.10	3.1
	B	3.8	4.5	0.12	3.7

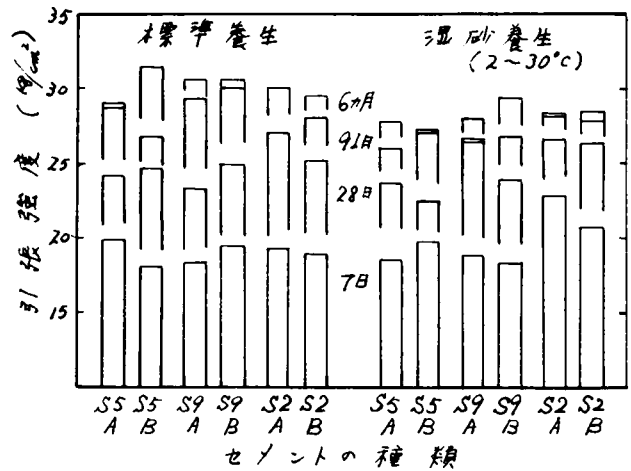
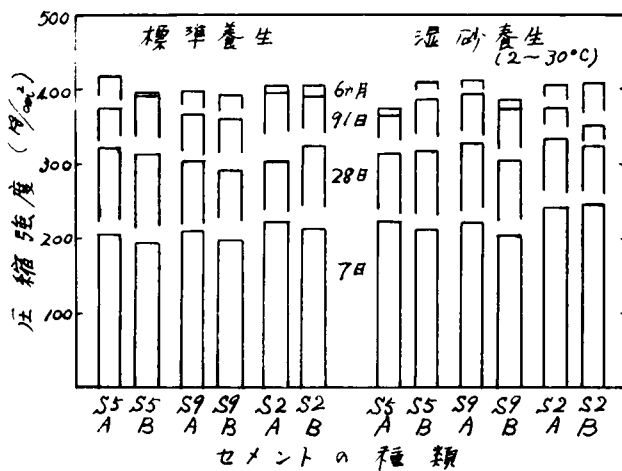
は顕著ではないが、粉末度の高いAのほうがBに比べてスランブはやや小さくなる傾向がある。ブリージングは、粉末度の高いAを用いたほうがBを用いた場合よりやや小となっている。Powers は、<sup>318)</sup>コンクリートのブリージングはセメントの比表面積やペーストの水量に支配されると述べ、粉末度が細かくセメント粒子が小さいほどペーストの粘着力が大となり、ブリージングは少なくなると報告している。

## ii) 硬化コンクリートの強度について

20℃の水中養生と外気温で湿砂養生したコンクリートの圧縮強度および引張強度試験の結果を図-2.3.12、図-2.3.13に示す。図-2.3.11の圧縮強度の試験結果にみられ

図-2.3.12 セメントの品質と圧縮強度

図-2.3.13 セメントの品質と引張強度



るように、短期材令では  $C_3S/C_2S$  比の高いセメントである S 2 を用いたものが強度が大きく、同一化学成分であれば、粉末度の高いもののほうが強度は高くなる傾向がある。しかし、材令が長期になると本実験に用いた程度の化学成分、粉末度の差では、これによる強度差はほとんど認められない。また、標準養生と屋外の湿砂養生との結果には大差がない。なお、引張強度はばらつきが大きく、図-2.3.13 のように一定の傾向はみられなかった。

一方、スランブの大きい建築用コンクリートの実験結果では<sup>317)</sup>セメントの化学成分や粉末度の圧縮強度への影響がやや大となっている。

## iii) コンクリートの動弾性係数について

標準養生を行なったコンクリートで求めた動弾性係数と圧縮強度との関係を示した図-2.3.14 にみられるように、圧縮強度が 200~400  $Kg/cm^2$  の範囲では、両者の関係は直線

で示され、セメントの化学成分や粉末度の影響はみられない。なお、建築用の軟練りコンクリート<sup>317)</sup>では、多少直線の勾配がことなっているが、これは骨材量と単位水量の影響と思われる。

図-2.3.14 圧縮強度と動弾性係数との関係

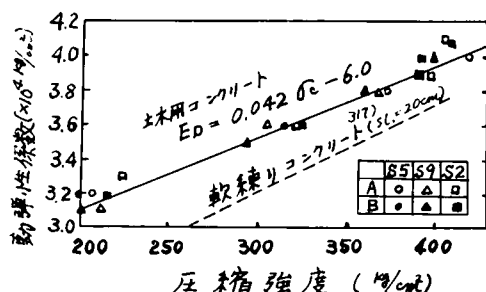
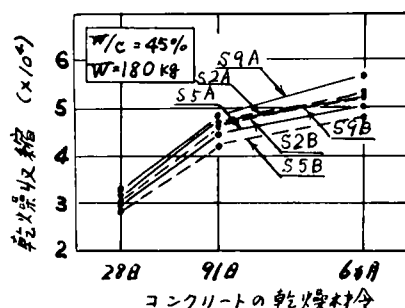


図-2.3.15 セメントの品質とコンクリートの乾燥収縮



#### IV) コンクリートの乾燥収縮について

□ 7.5×10×40 cmのはり供試体を用いて材令7日で水中より取り出し、以後温度20℃、相対湿度60%の恒温室でコンパレータ法により材令6ヵ月までの乾燥収縮を求めた結果を図-2.3.15に示す。粉末度の高いセメントAを用いたコンクリートがセメントBより材令6ヵ月までの結果では乾燥収縮が大となっている。なお、セメントの化学成分の影響については、 $C_2S$ が比較的多く $C_3S/C_2S$ 比の低いS9のセメントが乾燥収縮が大となっている。

#### V) コンクリートのクリープについて

コンクリートのクリープ試験は、材令14日まで標準養生した□7.5×10×40 cmのはり供試体を図-2.3.16に示すクリープ試験機に取り付け、 $64.6 \text{ kg/cm}^2$ の一定持続圧縮応力を加え、ホイットモアひずみ計を用いてクリープひずみを測定した。なお、測定は温度20℃、相対湿度85%の条件の恒温室で行なった。なお、同一寸法で同じ養生条件の無載荷の供試体について乾燥収縮を求め、載荷供試体で測定した全ひずみからこの値をひいてクリープひずみとした。試験結果を示した図-2.3.17にみられるように、セメントの化学成分、粉末度ともこの程度の変化ではクリープひずみに大差ない結果がえられているが、材令8週までの結果では乾燥収縮の場合と同様 $C_3S/C_2S$ 比の低いS9のセメントがわずかに大となる傾向がある。

結局、セメントの初期強度を高めるには、 $C_3S/C_2S$ 比の高い、換言すれば水硬率を大きくセメントの粉末度を高くしたほうが有利な結果がえられている。しかし、本実験に用いた程度の変化では顕著な影響はみられず、コンクリートの諸性質にも大差がないので、ごく初期に高強度をえるためには早強型あるいは微粉碎した超早強型のセメントにする必要がある。

#### (5) 製品用セメントについて

型わくにコンクリートをつめてからできるだけ早く脱型し早期に所要の品質をえて、使用現場に出荷するためには、初期材令に高強度のえられるセメントの使用が有利であり、超早強セメントはこれにもっとも適したものと考えられる。しかし、製品の経済性の問題もあり、その使用方法についてはさらに検討する必要がある。一般のセメントでは、早期脱型を行なうためには超早強セメントも含めて蒸気養生のような促進養生が必要になり、製品用セメントとしては高温養生に適したものでなければならない。

図-2.3.16 クリープ試験機

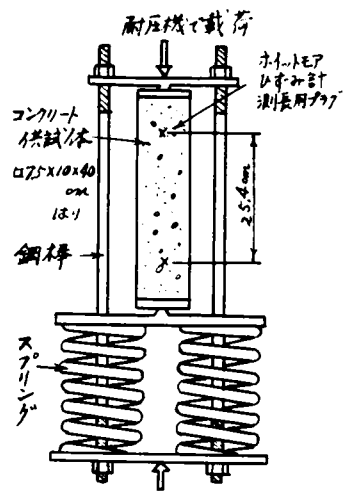
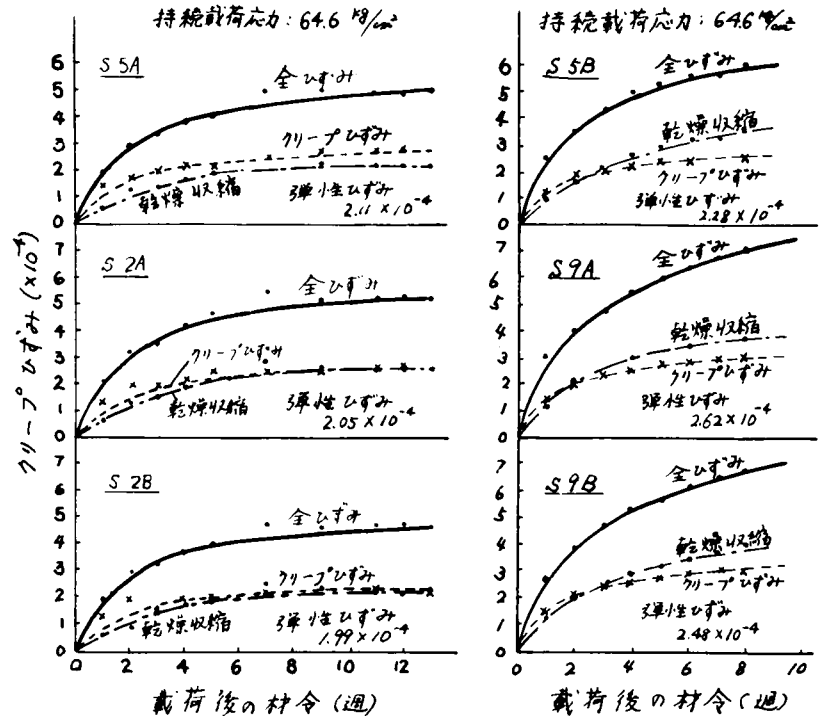


図-2.3.17 クリープひずみ測定結果



すでに、既往の研究で述べたように製品工業の盛んな諸外国とくにソ連や欧州では製品用セメントについて研究が進められ  $C_3S/C_2S$  比を高くし、粉末度は  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  程度で、高セッコウ型のものが推奨されている。これは、初期材令で養生温度を高くするとセッコウの溶解度が低くなることやセメントの粉末が細かくなると高強度をえるためにセッコウ量を多くする必要のあるためである。<sup>188), 193)</sup> 一方、わが国の市販セメントの分析結果より  $\text{SO}_3$  を調べてみると、外国のセメントに比べて一般に低く、普通セメントで 1.7~1.8%、粉末度の高い早強セメントで 2.4~2.5% となっている。宮沢<sup>319)</sup> はセメントに加えるセッコウの最適値について調べ、多少増加してもよいと報告しており、鈴木<sup>320)</sup> は最適値は 2.0~3.0% の範囲にあると述べている。したがって、蒸気養生に対するセッコウ量の影響を調べるため、普通セメントおよび早強セメントに無水セッコウをセメント量の 2% ( $\text{SO}_3$  で 1% 増) および 4% ( $\text{SO}_3$  で 2% 増) 添加し、モルタル供試体を作成し、蒸気養生を行なったのち圧縮強さの試験を実施した。

使用したセメントの試験成績を表-2.3.15 に、JIS モルタルの試験結果を表-2.3.16 に示す。この結果にみられるようにセッコウ 1% 増では、その添加の影響はほとんど認められないが 2% 増とした場合、材令 28 日の強さがいくぶん高くなる傾向があり、とくに粉末度の高い早強セメントで顕著であった。なお、本実験では練りませの際、セッコウを加えホバートミキサによる機械練りとしたが、セメント粉砕時に加え均一なものをつくってさらに検討する必

表-2.3.15 使用セメントの試験成績

セメントの種類	主な化学成分(%)					組成鉱物				比重	ブレン比表面積( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	凝 結		
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{SO}_3$	$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_4\text{AF}$			W/C (%)	始 充 (h-m)	終 結 (h-m)
普 通	22.3	5.0	3.2	65.3	1.6	53.6	23.6	7.8	9.7	3.16	3,230	26.8	2-25	3-36
早 強	21.0	5.0	3.0	65.8	2.5	63.2	12.6	8.2	9.1	3.13	4,200	29.2	1-51	2-48

表-2.3.16 蒸気養生したモルタルの圧縮強度におよぼすSO<sub>3</sub>の影響

セメント別 養生条件	標準養生	普通ポルトランドセメント			早強ポルトランドセメント			
		蒸気養生			標準養生	蒸気養生		
SO <sub>3</sub> 量 (%)		1.6	2.6	3.6	2.5	2.5	3.5	4.5
圧縮強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	1日	56	305	304	300	169	387	377
	7日	306	360	352	354	444	441	443
	28日	428	444	446	455	510	510	517

要があると考えられる。

また、近年、ごく初期材令に高強度のえられるアルミナセメントも土木構造物の急速施工に使用された実績があり、<sup>321)</sup>プレキャスト部材では、PCスラブの低温時のグラウト工事に用いた例もある。<sup>322)</sup>しかし、結晶の転移による長期材令における品質の低下、経済性などが問題になると思われる。

結局、(1)～(4)に述べたこともあわせ考えると、蒸気養生を行なう製品用セメントとしては、 $C_3S/C_2S$ 比が高く、粉末度を高くし、しかもセッコウ量を現在の添加量より多少多目にした早強型のものが望ましいと考えられる。今後、わが国における製品の需要の増大を考えると、セメントメーカーを中心に、超早強セメントの製品への利用も含めて製品用セメントの開発研究をさらに積極的に進める必要があると思われる。

#### (6) ま と め

セメントの組成鉱物や水和反応について調べ、各種セメントに対する蒸気養生の影響を検討し、製品用セメントについて考察した結果をまとめると、

- 1) 高温養生によってセメントの組成鉱物である $C_3S$ 、 $C_2S$ 、 $C_3A$ 、 $C_4AF$ などの水和が促進され、とくに $C_3S$ の水和が顕著で結晶性のよいカルシウムシリケート水和物を生成する。
- 2) 高温養生によりセメントの初期の水和反応を促進すると、水和生成物の緻密な被膜による長期水和の阻害、その微構造の不均一分布、空孔の増大、カルシウムシリケート水和物の安定化などのために長期材令への強度増進率が低下する。
- 3)  $C_3S/C_2S$ 比の高い早強セメントを用いると普通セメントのものと同一強度をえるのに単位セメント量が節約でき、蒸気養生期間の短縮や乾燥収縮、クリープなどの低減が可能である。
- 4) 普通セメントを用いる場合、その蒸気養生効果を高めるには、現在 JISで定められている65℃より70～80℃と最高温度をいくぶん高目にしたほうが有利である。
- 5) 混合セメントを用いると初期材令の強度発現が、普通セメントに比べてかなり劣るので、脱型を急ぐ製品では、マチュリチーを大とするか、促進剤の添加などが必要になり、混合比の少ないA種の使用も考慮しなければならない。
- 6) 粉末度のきわめて高い超早強セメントは単位セメント量300kgを用いた配合で、標準養生1日で約150 kg/cm<sup>2</sup>の強度がえられ、5.5 hの短時間の蒸気養生で材令1日で280 kg/cm<sup>2</sup>程度の値となり、初期材令の強度発現にきわめて有利である。
- 7) 普通セメントでも $C_3S/C_2S$ 比をいくぶん高く、粉末度を高目にしたものが、初期材令の強度は大となる。
- 8) 蒸気養生を行なう製品用セメントとしては、 $C_3S/C_2S$ 比が大きく、粉末度をかなり高くし、しかもセッコウ量を現在より多少多くした、初期材令に高強度のえられる早強型のものが適していると考えられる。

### § 3. 各種混和材料の影響

#### (1) まえがき

今日、ワーカビリティ、硬化速度、強度、耐久性、水密性、その他、コンクリートの性質を改善<sup>323), 324)</sup>するために混和材料が盛んに使用されている。市販されている混和材料の種類はきわめて多く、このうち使用量が比較的多く、コンクリートの配合計算に関係する混和材と、使用量が比較的少なく、それ自体はコンクリートの配合計算に無視され、薬品的な使い方をされる混和剤とに分類されるが、使用の目的によって分けると主なものにつぎのようなものがある。

A E 剤…………… コンクリート中に微小な独立したあわを一様に分布させる。

減水剤…………… セメント粒子を分散させ、単位水量を減少する。

硬化促進剤 …… コンクリートの硬化を促進する。

遅延剤…………… セメントの凝結時間を遅延させる。

ガス発生剤 …… モルタルコンクリートを膨張させるガスを発生する。

防水剤…………… コンクリートの水密性をます。

さび止め剤 …… 鉄筋のさびの進行を抑制する。

収縮低減材 …… コンクリートの乾燥収縮を低減する。

ボラゾン…………… 混和材の一種でそれ自体は水硬性はないがコンクリート中の水に溶けている水酸化カルシウムと常温で徐々に反応して不溶性の化合物をつくるシリカ質材料を含むもの。

最近では、コンクリート製品にも混和材料が必要に応じて用いられる傾向にある。<sup>325)</sup> 混和材料を製品に用いるのが有利であるかどうかは、混和材料の性質はもとより製品の種類、製造方法、所要の品質などによって相違するから、その使用の適否について一般的に示すことはできないが、使用しようとする混和材料の利点と欠点、均等性、コンクリートの諸性質におよぼす影響を十分に調査した上、決めなければならない。

コンクリート製品では蒸気養生を行なう場合が多いので、各種混和材料の蒸気養生におよぼす影響について十分調査し、蒸気養生効果を高める混和材料を選定できたり、逆にその混和材料に適した養生条件を採用することができれば、きわめて有利である。したがって、各種混和材料を用いたコンクリートを蒸気養生し、その影響について検討を行なった。

#### (2) 各種混和材料を用いたコンクリートの蒸気養生

A E 剤、減水剤、硬化促進剤、ボラゾンなどの混和材料は一般のコンクリート工事に広く用いられ、製品にも必要に応じて用いられているので、代表的なものとして、A E 剤としてピンソルレジン、減水剤としてポゾリス<sup>®</sup>5、硬化促進剤として塩化カルシウム、遅延剤としてリタール、ボゾランとしてフライアッシュを用いた各種コンクリートを蒸気養生し、その強度特性におよぼす影響を調べた。<sup>326)</sup>

##### 1) 実験の概要

普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材は安倍川産で最大寸法 15 mm、細骨材は相模川産で粗粒率が 3.11 のものを使用した。コンクリートは表-2.3.17 に示すように各種混和材料

表-2.3.17 実験に用いたコンクリートの配合

コンクリートの種類	最大寸法 (mm)	スランブ (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和材料の単位量	備考
						W	C	S	G		
P1	15	3±0.5	—	35.6	4.0	160	450	746	1130	—	ブレーン
AE	15	3±0.5	4~4.5	33.3	3.8	150	450	655	1082	4500g	ピンソルレジン
Pozzolith	15	3±0.5	2~2.5	33.6	3.8	151	450	676	1117	2250g	ポゾリス <sup>®</sup> 5
CaCl <sub>2</sub>	15	3±0.5	—	35.6	4.0	160	450	746	1130	4500g	塩化カルシウム
Retarl	15	3±0.5	—	35.6	4.0	160	450	746	1130	2700g	リタール
FA	15	3±0.5	—	33.1	4.0	149	360	709	1070	90kg	フライアッシュ

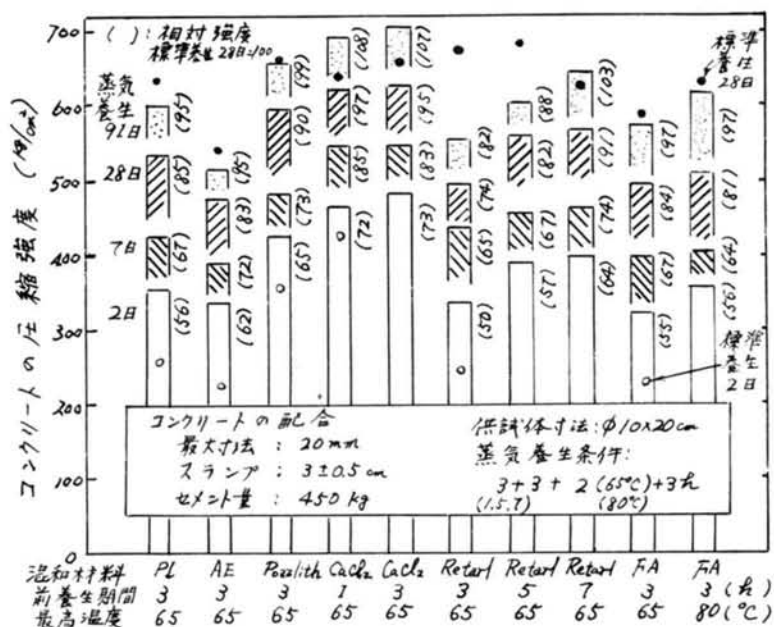
を用い、単位セメント量 450 kg の富配合で、目標スランブ 3 cm のかた練りとした。

供試体の作成には  $\phi 10 \times 20$  cm の円柱形型わくを使用し、可傾式ミキサで練り混ぜたコンクリートを棒形振動機によって締め固めた。蒸気養生には、小型の蒸気養生そうを用い、前養生 + 温度上昇 + 等温 (最高温度) + 冷却期間 = 3 + 3 + 2 (65℃) + 3 h の条件で、マチュリチーは 430℃・h の養生を行ない、材令 2 日、7 日、28 日および 91 日で強度試験を行なった。なお、塩化カルシウムを用いたコンクリートでは前養生 1 時間、リタールを用いたものは 5 時間および 7 時間についても検討した。また、フライアッシュは温度上昇速度を 15 deg/h より 20 deg/h とし最高温度 80℃での養生も行なった。供試体は 2 日目に脱型し、すべて 20℃の霧室で後養生を行なった。圧縮強度のほか曲げ強度、引張強度、付着強度なども求めた。

## 2) 実験結果とその考察

実験結果を示した図-2.3.18 のようにコンクリートの強度は使用する混和材料によって異なるが、材令による蒸気養生したコンクリートの強度発現の傾向はほぼ同様であり、2 日より 28 日への強度の伸びはブレンコンクリートとフライアッシュコンクリートがやや大であ

図-2.3.18 各種混和材料を使用したコンクリートの圧縮強度



る。標準養生 28 日強度と蒸気養生強度とを比較すると各材令とも塩化カルシウムを用いたものがもっとも相対強度が高く蒸気養生効果が大きく、リタールを用い前養生を長くしたもの、ボゾリス No.5 を用いたものもブレンコンクリートより相対強度は大きい。

まず、AE 剤を用いたコンクリートは、単位水量は減少できるが空気の連行されるため各材令の強度はもっとも低い。一方、減水剤を用いたコンクリートは、各材令の強度がブレンコンクリートよりかなり大である。塩化カルシウムをセメント量に対し 1% 添加したものは、各種コンクリートの中で最高の強度を示し、Klieger<sup>210)</sup> も指摘しているように高温養生に対してきわめて有利な混和剤でありしかも前養生期間も短縮することができる。リタールを用いたコンクリートは 28 日標準強度に比べて各材令の強度は低い、前養生期間を長くするとブレンコンクリート以上の養生効果がえられている。しかし、養生期間が長くなるので多少不利になる。

また、フライアッシュを用いたコンクリートの初期強度はブレンコンクリートより劣るが材令 28 日ではほぼ同じ値であり、養生温度を 80℃ (マチュリチー 500℃・h) とすると初期強度も改善されブレンなみとなる。セメントをフライアッシュで代替すると材料費が低減で



き経済的にも有利である。しかし、フライアッシュの場合は、柳川の報告<sup>327)</sup>にみられるように、その品質の良否がコンクリートの性質に影響するので良品質のものを用いる必要がある。本実験に使用したものは $\text{SiO}_2$  61.4%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  25.7%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  3.4%で比重2.23、ブレン比表面積 $3610\text{ cm}^2/\text{g}$ 、所要水量比93%、強熱減量0.32%のものである。

なお、圧縮強度の高いものが曲げ強度、引張強度、付着強度なども高くなる傾向があるが、圧縮強度に対する混和材料の影響に比べて他の強度特性に対する影響は小となる傾向がえられている。<sup>326)</sup>他の強度特性については第5章に述べる。

結局、使用する混和材料の種類によって、コンクリートの蒸気養生の効果はことなり、促進剤や減水剤の使用が比較的有効であり、フライアッシュを用いる場合には養生温度を高くしたほうがよい結果がえられる。また、各種混和材料によって、その使用量や養生条件を考慮すれば、本実験にとりあげたものは製品用コンクリートに十分に使用することができるといえよう。なお同一種の混和剤でもその種類はきわめて多く、その品質にもかなりの差があるので、使用にあたっては十分な試験を行なうことが必要である。

### (3) AE剤を用いたコンクリートの蒸気養生

<sup>169)</sup>

AE剤を用いてコンクリート中に直径が主として $20\sim100\mu$ くらいの独立した気ほうを無数に入れたAEコンクリートは、①ワーカビリティを改善し、単位水量を減少できる、②耐久性とくに凍結融解に対する抵抗性が大きくなる、③材料の分離が少なく、水密性が大となるなどのすぐれた特徴があり、コンクリートの品質を改善できるため一般のコンクリート工事に広く使用され、コンクリート製品でも使用される場合がある。しかし、AEコンクリートでは空気量1%の増加に対して28日の圧縮強度は4~6%低下することが知られており、同一セメント量でも強度低下を考慮しておかなければならない。また、製品では成形後間もなく蒸気養生を行なうので連行空気に対する蒸気養生の影響も考慮して養生条件を採用する必要がある。したがって、蒸気養生条件をかえたり、連行空気量のことなるAEコンクリートを用いて、ブレンコンクリートと比較して検討を行なった。<sup>328)</sup>

#### 1) 実験の概要

普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材は安倍川産で最大寸法 $10\text{ mm}$ のもの（比重=2.64、粗粒率=61.0）、細骨材は相模川産の砂（比重=2.61、粗粒率=3.15）を用いた。使用したコンクリートの配合はビューム管を対象として単位セメント量 $450\text{ Kg}$ の富配合で、スランブは $6\text{ cm}$ を目標とし、AEコンクリートでは空気量のことなる3種の配合を用いた（表-2.3.18 参照）。

表-2.3.18 コンクリートの示方配合

コンクリートの種類		最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				単位AE剤量 (cc)
							W	C	S	G	
ブレンコンクリト		10	5~7	—	40.0	3.7	180	450	632	1093	—
AE	AE-S	10	5~7	4~4.5	34.0	3.5	153	450	582	1096	2330
コンク	AE-1	10	5~7	3~3.5	34.9	3.5	157	450	592	1125	1670
リート	AE-2	10	5~7	7~7.5	33.3	3.3	150	450	975	1085	5000

$\phi 10 \times 20\text{ cm}$ の円柱形型わくを用いて供試体を作成し、実験用の蒸気養生そうを用いてつぎの実験を行なった。

①ブレンコンクリートとAEコンクリート(AE-S)を用いてあらかじめ $75^\circ\text{C}$ に保った養生そうに入れ急激な温度上昇をコンクリート供試体に与えた場合と $20^\circ\text{C}/\text{h}$ の温度上

昇速度で徐々に温度を上昇した場合についてその圧縮強度におよぼす影響を調べた（材令 1 日および 28 日）。

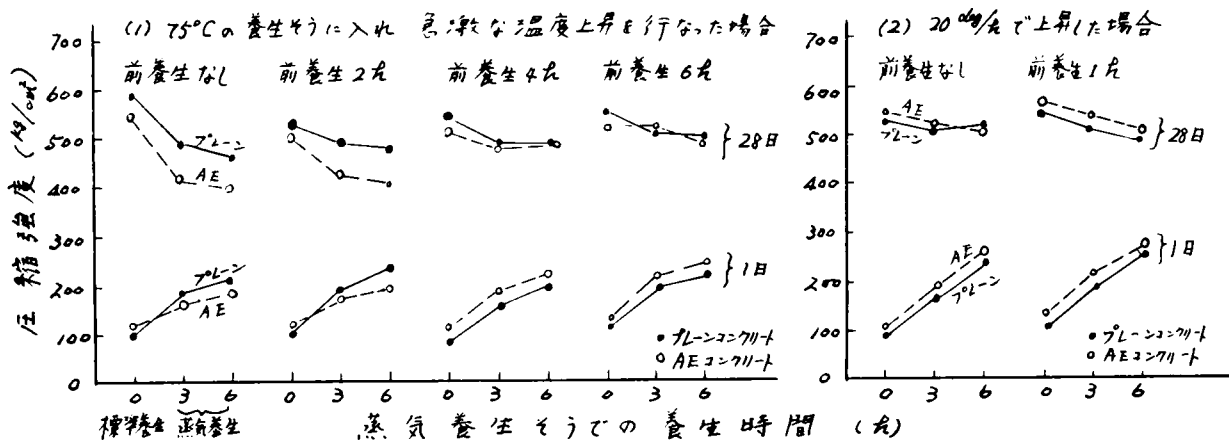
② プレーンコンクリートと空気量のことなる 2 種の A E コンクリート（A E-1、A E-2）を用い、温度上昇速度（ $15 \text{ deg/h}$ 、 $20 \text{ deg/h}$ ）、最高温度（ $55^\circ\text{C}$ 、 $75^\circ\text{C}$ ）、養生期間（3 h、5 h）をかえて養生条件の圧縮強度におよぼす影響を調べた（材令 1、3、7 および 28 日）。なお、蒸気養生後所定材令までの後養生は  $20^\circ\text{C}$  の水中養生とした。

## 2) 実験結果とその考察

### i) 温度上昇速度の影響について

温度上昇速度の影響を示した図-2.3.19 にみられるように、前養生しないで急激な温度

図-2.3.19 温度上昇速度がプレーンおよび A E コンクリートの圧縮強度におよぼす影響



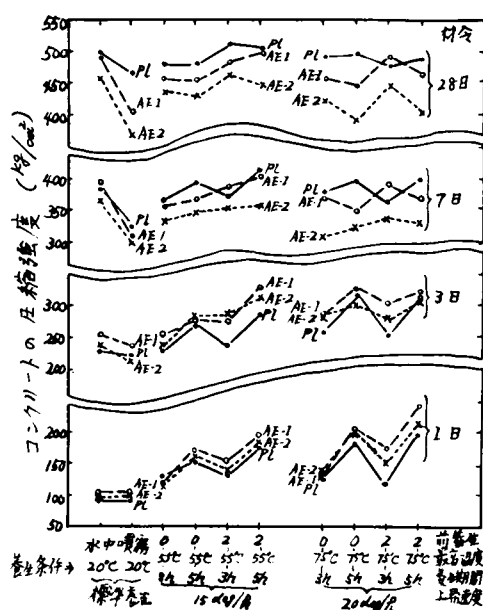
上昇を与えたものは、標準養生に比べて、材令 28 日では 30% 近くの強度低下を示しており、この値はプレーンより A E コンクリートのほうが大きい、また、養生時間が長くなると脱型時の 1 日強度は高くなるが、材令 28 日ではむしろ低くなる傾向がある。A E コンクリートでは、前養生期間が短かく急激な温度上昇を行なうとプレーンコンクリートに比べて材令 28 日への強度の伸びが悪く、これはコンクリート中の気泡が膨張し、組織のゆるみを生ずることも影響していると思われる。なお、前養生期間を長くしたり、温度上昇速度をゆるやかにすると、この悪影響は緩和される。

### ii) 蒸気養生条件の影響について

連行空気量が 3 ~ 3.5% と 7 ~ 7.5% の 2 種の A E コンクリート（記号 A E-1 と A E-2）および比較のためにプレーンコンクリートを用いて蒸気養生条件が圧縮強度におよぼす影響を調べた図-2.3.20 にみられるように、前養生期間なしより 2 時間とって蒸気養生を行なったほうが各材令の強度は高くなる傾向がある。また、最高温度  $75^\circ\text{C}$  で養生したほうが  $55^\circ\text{C}$  で養生したものより材令 3 日までの強度は高いが、以後の材令では、むしろ  $55^\circ\text{C}$  養生のほうが高くなり、とくに空気量の多いコンクリートではこの傾向が顕著である。養生期間については、短期材令ではその期間の長いほうが明らかに強度は高いが、材令 7 日以上になるとプレーンコンクリートでは大差なく、A E コンクリートではむしろ短時間養生のほうが強度は高くなる傾向がある。なお、前養生期間が A E およびプレーンコンクリートの諸強度におよぼす影響を検討した実験<sup>330)</sup>でも、A E コンクリートは前養生を長くしたほうがよい結果がえられている。

結局、A E コンクリートの蒸気養生を行なう場合には、以上の結果より、前養生期間をできるだけ長くとり、脱型に必要な強度のえられる範囲内で養生温度を低目にしたほうが長期

図-2.3.20 蒸気養生条件のことになったブレーンおよびA Eコンクリートの圧縮強度



の品質よりみて有利であり、養生温度を高目にするときは目標空気量をやや少なくするのがよい。また、このような蒸気養生を行なえば、A Eコンクリートとブレーンコンクリートとの強度比は、標準養生の場合とほとんど変わらない。

#### (4) 硬化促進剤の使用について

硬化促進剤（以下促進剤という）を用いると初期材令の強度が高くなり、コンクリート製品でもその使用が注目されている。促進剤としては塩化カルシウムがもっとも一般的に用いられている。

ポルトランドセメントに対する塩化カルシウムの作用は、<sup>331)</sup> Rosenberg、Balazs <sup>207)</sup> の研究によると、

①  $C_3S$  の水和を促進するが  $C_2S$  とは反応しない。

②  $C_3A$  と反応し、 $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot xH_2O$  の形の塩をつくる。

ことが指摘されている。すなわち、塩化カルシウムは接触反応剤（触媒ともいう）としてケイ酸 3 石灰の水和を促進するため、強度が早期に発現できるのである。一般に、セメント量に対して 1～2% 添加するのが適当で、2% 以上加えてもその効果が少なく、逆に添加量が多過ぎるとコンクリートがもろくなるので注意しなければならない。<sup>332)</sup> また、純度のよい塩化カルシウムの使用が望まれる。米国開拓局のコンクリートマニュアルでは、一般の工事に 2% までの使用を認めている。コンクリート製品では、無筋の場合 2% までの使用は推奨されるが、鉄筋のさびの問題がありプレストレストコンクリート製品には使用してはならない。また、かぶりの薄い鉄筋コンクリート製品では 1% までが安全であろう。なお、硫酸塩に対する抵抗性が劣るのでこの作用を受ける場合、電食のおそれのある場合などには用いないほうがよい。<sup>333)</sup>

促進剤としては、塩化カルシウムのほかにカル（ $CaO \cdot CaCl_2 \cdot nH_2O$ ）、塩化第 2 鉄（ $FeCl_2$ ）塩化アルミニウム（ $AlCl_3$ ）、炭酸ソーダ（ $Na_2CO_3$ ）、炭酸カリ（ $K_2CO_3$ ）、ボウ硝（ $Na_2SO_4$ ）、ケイ酸ソーダ（ $Na_2SiO_3$ ）などがあるが、塩化カルシウム以外は一般に用いられていない。

コンクリート製品の製造の際に促進剤の使用を必要とするのは、気温が低くて、コンクリートの硬化、初期強度発現の遅れる冬期であり、ここでは低温度における塩化カルシウム使用の効果を調べ、つぎに蒸気養生を行なった場合の初期強度について実験的に検討し、さらに促進剤によ

る鉄筋の腐食とその防止についても既往の研究を調査し考察を行なった。

### 1) 塩化カルシウムによる初期強度の改善<sup>303)</sup>

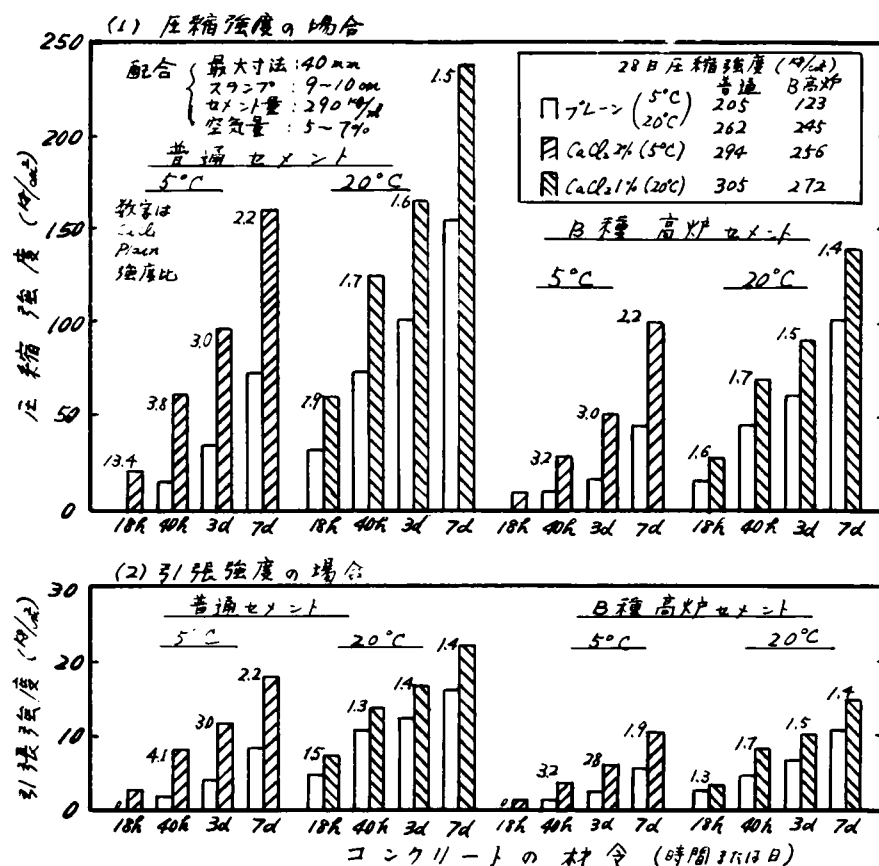
護岸ブロック、テトラポットなどの大型の製品では、型わくの取りはずしや製品の移動の時期を早めるため冬期の低温時には促進剤の使用を考慮する必要がある。また、耐海水性、化学抵抗性などの要求されることから混合セメントも使用されており、この種セメントでは初期強度が劣るので促進剤の使用が必要になってくる。

したがって、普通セメントとB種高炉セメントを用い、低温の5℃成形では塩化カルシウムを2%、20℃成形では1%添加し、最大寸法40mm、スランブ9~10cm、単位セメント量290kgの大型ブロック用配合について、脱型後も5℃あるいは20℃で養生し、初期材令の強度を調べ、促進剤の効果について検討した。

実験結果を示した図-2.3.21(1)、(2)にみられるように、塩化カルシウムによる硬化促進の効果は材令の若いほうが著しく、また養生温度はことなるが添加量は1%より2%のほうが顕著である。強度の絶対値はことなるが、B種高炉セメントのコンクリートに対する促進剤の効果は、図中の数字でみられるように普通セメントの場合とほぼ同様である。5℃の低温養生の場合、B種高炉セメントに塩化カルシウムを2%加えると普通セメント以上の強度がえられており、20℃養生で1%添加の場合は普通セメントのブレンコンクリートに近い値を示している。なお、初期材令のみならず材令28日も強度は大となっており、低温時はとくに促進剤の効果が大きい。Shideler<sup>334)</sup>も、塩化カルシウムを用いた場合、低温度では材令28日の強度もかなり大となることを指摘している。

また、塩化カルシウムの添加は低温時の引張強度の改善にも有効であり、圧縮強度の場合とほぼ同程度の強度増加率を示している。

図-2.3.21 初期材令のコンクリート強度におよぼす塩化カルシウム添加の影響



2) 促進剤を用いたコンクリートの蒸気養生<sup>297)</sup>

塩化カルシウムを用いたコンクリートの蒸気養生効果についてはすでに本節に述べたが、とくに単位セメント量を 300、350 および 400 kg の 3 種にかえた配合のコンクリートについて、低温の 5℃ で成形し、セメントの種類、促進剤の有無によって蒸気養生期間をかえて脱型時の強度におよぼす影響を検討した結果を表-2.3.19 に示す。なお、促進剤としては塩化カルシウムと減水促進剤であるポズリス<sup>10</sup>を用いた。

表-2.3.19 低温成形、蒸気養生を行なったコンクリートの脱型強度におよぼす促進剤の影響

成形温度 (°C)	使用 セメント	単位セメント量 (kg)	蒸気養生期間と脱型時の圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		
			プ レ ー ン	塩化カルシウム 1%	ポズリス <sup>10</sup> ・1%
5	普 通	300	4+3+2+3h 134(100)	2+3+2+3h 143(107)	2+3+2+3h 143(107)
		350	" 160(100)	" 198(124)	" 203(127)
		400	" 170(100)	" 288(166)	" 282(162)
	早 強	300	2+3+2+3h 189(100)	1+3+2+3h 207(110)	1+3+2+3h 249(132)
		350	" 220(100)	" 270(123)	" 276(125)
		400	" 238(100)	" 313(131)	" 331(139)

この結果にみられるように促進剤を加えることにより、脱型時の強度はかなり高くなりしかも蒸気養生の際の前養生期間を 1～2 時間短縮することができる。また、同じ脱時強度をえるには等温養生期間も短かくできるので、養生期間をさらに短縮することが可能になる。なお、富配合コンクリートになるほど強度増加の傾向は顕著である。なお、混合セメントのように初期強度の低いセメントを用いる場合には、蒸気養生の際の脱型強度を改善するのに前節に述べたように促進剤の使用が効果的である。なお、減水促進剤のポズリス<sup>10</sup>を用いた場合、塩化カルシウムを用いたものとほぼ同程度の初期強度がえられている。

なお、塩化物以外の促進剤としてはボウ硝( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )、結晶核あるいは水和セメントなどがある。松田ら<sup>335)</sup>はボウ硝をセメント量に対して 4% 程度加えることにより、塩化カルシウムと同程度の初期強度発現がみられると報告している。Ayapov<sup>211)</sup>は硬化促進剤にはアルカリ系のものと塩化物系の 2 つのグループがあり、両者の併用がもっとも効果的で、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  と  $\text{CaCl}_2$  との組合せがもっとも代表的なものであると述べている。また、水和したセメントを微粉砕することによってえられる結晶核( $\text{C}_3\text{AH}_6$ )、を加えると、セメントの水和が促進されて強度が増加すると、Butt<sup>213)</sup>ら、Ratinov<sup>336)</sup>ら、が報告している。竹本らは<sup>269)</sup>種子結晶を添加して初期強度がますのは  $\text{C}_3\text{S}$  の水和が促進されるためであると述べている。

3) 鉄筋の腐食とその防止について

コンクリート中に埋込まれた鉄筋はコンクリートがアルカリ性があるためにさびないが、①コンクリートが多孔質である、②コンクリートにひびわれを生じている、③かぶりが薄くコンクリートが中性化している、④ある種の化学的混和剤を用いる、などの場合にはさびることがある。

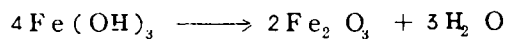
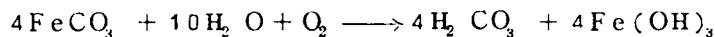
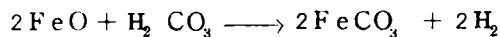
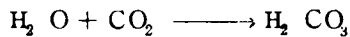
コンクリート製品では一般にセメント量が多く、水セメント比が小さいこと、強力な振動締固めを行なうことなどにより密実なコンクリートがえられ、鉄筋の周囲にもコンクリートが行きわたっているが、反面、かぶりが薄いこと、促進養生を行なうものが多いこと、促進剤として塩化カルシウムを用いることがあることなどにより、鉄筋の腐食の問題も十分に考慮しておかなければならない。

腐食とは、金属とこれを取りまいてあるものとの間の化学的あるいは電気化学的反應で、金属はその表面から侵食され、消耗されることをいう。代表的な構造材料である鉄、鋼などもこの影響を受ける。Monfore<sup>337)</sup>らは、金属の腐食を、金属が媒質の作用によって均等に消耗されていく一般的腐食と金属の表面の一部が腐食されやすい環境にある場合、そこに電極ができてイオン化が進み腐食される部分的腐食にわけている。

一般に、鉄の腐食の場合は、空気中の酸素にふれて、

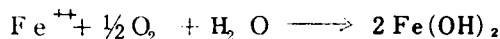


大気中の水分と炭酸ガスが反応して生じた炭酸が酸化鉄に作用する。すなわち、つぎの化学式で示される。



水酸化第2鉄 ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) がいわゆる鉄のさびである。  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  は赤さびといわれるもので、これができることさびは進行する。鉄筋がひびわれを通して外気に接したり、コンクリートがポーラスな場合にはこの反応が進む。

コンクリート中ではセメントの水和反応によって  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が生じているのでコンクリートはアルカリ性 (PH = 11 程度) で鉄筋はさびないが、コンクリートが中性化いわゆる炭酸化して PH が低下したり、電解質の存在で安定性がくずれると腐食が進行する可能性がある。たとえば、飽水された状態の鉄筋コンクリート中に強電解質である塩化カルシウムが溶解していると、電流を通しやすくなるので、陽極で鉄が酸化され、陰極では水素を生じこれが水に溶けている酸素により酸化され水となる。酸化された鉄イオンは酸素と水との反応により水酸化第1鉄 ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) を生じる。すなわち、



したがって、電解質混和剤の使用量については十分に注意しなければならない。

コンクリート中に促進剤として塩化カルシウムを加えた場合、一部は  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  と反応して、 $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  の形の結晶性の複塩をつくるが、この反応の進むのは遅く、Ros<sup>331)</sup>enber<sup>338)</sup>gの研究では、セメント量に対し2%の  $\text{CaCl}_2$  を加えた場合に7日間水和させて、水セメント比25%のときで95%の未反応の塩化カルシウムが残存していると報告している。Balazs<sup>207)</sup>らもセメントと反応しないで、液相中に残存している  $\text{CaCl}_2$  が鉄筋を腐食する可能性のあることを指摘している。したがってこれを避けるためにはできるだけ使用量を少なくしなければならない。

コンクリートマニュアルでは、密実でしかもかた練りの一般構造用コンクリートでは2%までの使用を認めているが、できるだけ1%以下にするのがよいとしている。もちろん、無筋の製品では2%までの使用はさしつかえないが、鉄筋コンクリート製品では1%以下にすべきであり、ひびわれのでやすい製品や電食のおそれのあるものには用いてはならない。

Monfore<sup>337)</sup>とVerbeck<sup>332)</sup>の研究によると引張応力の働いているPC鋼線はさびやすいと報告されており、PC製品には使用しないほうが安全である。1968年のFIPシンポジウム<sup>339)</sup>でも鋼材の腐食について検討され、塩化カルシウムを用いると鋼材がさびやすく、引張強さや伸びも低下したと報告されている。Günter<sup>209)</sup>もPC鋼線に対する塩化カルシウムの影響について研究し、腐食の進行は初期材令で早く、8日以後になるとそれほど進行しないが、濃度が高い場合には進むこと、とくにひびわれが存在すると局部的に腐食の進行することを指摘している。近藤<sup>340)</sup>は電食に対する混和材料の影響について研究し、塩化カルシウムを入れると電食現象が顕著になるがリグニンスルホン酸カルシウムを併用するとこれがインヒビター (抑

制剤)として働き、その増加率は小となると報告している。

Nurse は、<sup>188)</sup>促進剤の使用による鉄筋の腐食の可能性を指摘し、この防止には鉄筋のコーティングやさび止め剤の使用を推奨し、さらに鉄筋を腐食しない促進剤たとえば塩化錫の使用を検討する必要があるとしている。さび止め剤としては、安息香酸塩、亜硝酸塩などの使用を Mo-skvin ら<sup>341)</sup>はすすめており、Ratinov ら<sup>336)</sup>は硝酸ナトリウムの使用が効果的であると述べている。さび止め剤の使用量は促進剤より多少多くしなければならない。松田らも、<sup>342)</sup>塩化カルシウム含有コンクリートの防錆について研究し、セメント重量に対し 2% までの塩化カルシウムを用いた場合、その塩化カルシウムに対して亜硝酸ナトリウム  $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{100}$  と重クロム酸カリウム  $\frac{1}{50} \sim \frac{1}{200}$  との併用が有効で、さび止め剤を加えてもセメントの物理的性質に悪影響はないと述べている。

Blenkinsop は、<sup>343)</sup>密実で十分に締め固めたコンクリートとポーラスなコンクリート中に種類の深さに鉄筋を埋め、塩化カルシウムをセメント量に対し 2% 加え、空中と水中との 2 種の養生条件で腐食に対する影響を 5 年間にわたって調べ、密実なコンクリートではかぶりを 12.7 mm としておけば腐食の影響は認められなかったが、ポーラスなものは 19 mm のかぶりでも腐食されていたと報告している。

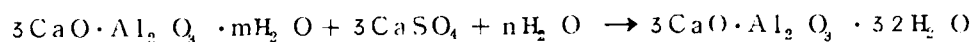
促進剤による鉄筋の腐食とその防止については、中性化や耐久性の問題とも関連づけてさらに研究を進める必要がある。

結局、1)～3)をまとめると、促進剤として塩化カルシウムをセメント量に対して 1～2% 用いることによってコンクリートの初期強度は著しく改善され、蒸気養生効果を高めるためにも、促進剤や減水促進剤の使用はきわめて有利で、脱型時の強度を高め、養生期間を 2 時間程度短縮することができる。しかし、塩化カルシウムは触媒として働き、大部分はペース中に残存しているので、鉄筋を腐食する可能性があり、鉄筋コンクリート製品では 1% 以下にすべきであり、しかもさび止め剤との併用がすすめられており、この点減水促進剤の使用が望ましい。なお、かぶりの薄い製品、ひびわれの発生しやすい、電食のおそれのある製品、硫酸塩の作用を受ける場合、PC 製品などには塩化カルシウムを使用してはならない。

#### (5) 収縮低減材の使用

現在、コンクリートの乾燥収縮を低減し、ひびわれ発生を防止することを目的として、セッコウを基剤とする収縮低減材が市販されている。<sup>344)</sup>コンクリート製品では部材と部材とのジョイントに生じるひびわれを防止するには、コンクリートの乾燥収縮はできるだけ小さいものが望ましい。また、すでに述べたように蒸気養生用のセメントは高セッコウ型のものが望ましいが、収縮低減材を混合することによってセッコウ量をますことができる。したがって、収縮の低減と蒸気養生に対する効果を調べることを目的として実験を行なった。

収縮低減材は、副産化学無水セッコウに石灰石粉および若干の界面活性剤を加えたもので、その比重は 2.80 である。乾燥収縮が低減される機構は、セッコウがセメント中のアルミン酸石灰の水和物と反応してエトリンジャイト ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) の針状結晶を析出するが、この結晶の適度の膨張がコンクリートの乾燥収縮量を減少するためで、反応式はつぎのように示される。



なお、膨張効果を高め、初期材令にコンクリートに膨張性をもたらし膨張材あるいは無収縮セメント<sup>345)</sup>も開発されており、製品への利用について検討を行なった小野の報告<sup>346)</sup>もあるが、ここでは収縮低減材を用いて蒸気養生を行ない強度および収縮におよぼす影響を調べた。

#### 1) 実験の概要

表-2.3.20 に示す品質の普通および早強ポルトランドセメントを用い、収縮低減材はセッコウ系 (比重 = 2.80、 $\text{CaSO}_4$  = 約 55%) のもので、セメント量に対し 8% 代替した。粗骨

材は最大寸法 15 mm の安倍川砂利、細骨材は相模川砂である。コンクリートは目

表 2.3.20 製したセメントの品質

セメント の 種 類	主 な 化 学 成 分 (%)					鉱 物 組 成 (%)				主 な 物 理 的 性 質							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	比 重	ブレンド値 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結		圧縮強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )			
												始 発 (h-m)	終 結 (h-m)	1 日	5 日	7 日	28 日
普 通	22.3	5.0	3.2	65.5	1.6	53.6	23.6	7.8	9.7	3.16	5230	2-25	3-30	-	155	255	414
早 強	21.0	5.0	3.0	65.8	2.5	63.2	12.6	8.2	9.1	3.14	4200	1-50	2-49	100	220	325	470

標スランブ 3 ~ 4 cm のかた練りとし、一般製品用配合と富配合の 2 種とした (表 2.3.21 参照)。

表 2.3.21 コンクリートの配合

セメント の 種 類	最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	S/C (%)	W	単 位 量 (Kg/m <sup>3</sup> )				収縮低減材
						C	S	G		
普 通	15	3 ~ 4	45.7	42	160	350	786	1097		0
			49.7			322	786	1094		28
			36.9	40	168	450	707	1072		0
			40.6			414	704	1069		36
早 強	15	3 ~ 4	47.1	42	166	350	776	1089		0
			51.5			322	776	1086		28
			39.1	40	176	450	697	1057		0
			42.5			414	694	1054		36

20℃の恒温室で容量 60ℓ の可傾式ミキサを用いて練りませ、φ10×20 cm の円柱形型わくおよび口 10×10×40 cm のはり型わくに棒形振動機 (φ28、8000rpm) を用いて成形した。蒸気養生は前養生 + 温度上昇 + 等温 + 冷却期間 = 2 + 3 + (65℃) + 16h の条件で行ない、その後は材令 7 日まで水中養生し、それ以後は空中養生と水中養生とした。材令 1 日、7 日および 28 日で圧縮強度および引張強度を求めた。乾燥収縮は材令 1 週まで水中養生後、温度 20℃、相対湿度 50% の乾燥室に移しコンパレータ法により実測した。

## 2) 実験結果とその考察

### i) 圧縮強度と引張強度について

表 2.3.22 にみられるように、収縮低減材を用い蒸気養生したコンクリートの圧縮強度は、普通セメントおよび早強セメントとも加えないものより低くなっている。これは、セメントの 8% を代替したため、単位セメント量が小となり、純水セメント比 (W/C) が大となるためと考えられる。しかし、富配合コンクリートで材令 7 日より空中養生した場合には、収縮低減材を用いたものがよい結果がえられている。

引張強度についてはばらつきが大きく一定の傾向はえられていないが、粉末度の高い早強セメントのほうが普通セメントより収縮低減材混入の効果は大きい。なお、混合材はコンクリート中に均一に混合する必要があるが、混合量の少ない場合には、セッコウ単味でしかもセメントの粉砕時に加えるのが望ましいと考えられる。



表-2.3.22. 蒸気養生したコンクリートの強度におよぼす収縮低減材の影響

セメント の 種類	単位 セメント量 kg	収縮 低減材 kg	引 張 強 度 (kg/cm <sup>2</sup> )					引 張 率 度 (kg/cm <sup>2</sup> )				
			蒸 気 養 生				標準養生	蒸 気 養 生				標準養生
			1 日	7 日	28 日	空中養生 28 日		1 日	7 日	28 日	空中養生 28 日	
普 通	350	0	2.44	3.78	4.77	5.09	4.65	2.55	3.35	3.62	3.49	3.61
	322	28	2.45 (100)	3.22 (85)	4.46 (95)	4.75 (95)	4.56 (98)	2.77 (100)	2.96 (88)	3.17 (88)	3.96 (115)	4.10 (115)
	450	0	3.48	4.48	5.81	5.94	5.75	3.09	3.65	4.05	4.00	4.09
	414	36	3.01 (86)	4.29 (96)	5.61 (95)	5.28 (101)	5.85 (98)	2.66 (86)	3.37 (95)	4.44 (110)	4.48 (112)	4.05 (99)
早 強	350	0	3.51	4.00	4.62	5.21	4.82	3.04	3.51	3.71	4.01	4.45
	322	28	3.07 (95)	3.71 (95)	4.58 (99)	5.00 (96)	5.24 (109)	2.85 (95)	3.28 (95)	3.52 (89)	3.65 (91)	4.38 (98)
	450	0	4.45	5.14	5.72	6.16	5.98	3.19	3.68	4.26	4.29	4.28
	414	36	4.15 (89)	4.58 (89)	5.88 (99)	6.54 (105)	6.54 (101)	3.52 (104)	3.90 (106)	4.24 (99)	4.88 (115)	4.41 (104)

(注) ( ) 内の数字は収縮低減材を用いないもの (100) に対する用いたものの比

## ii) 乾燥収縮について

表-2.3.25 にみられるように収縮低減材を用いたコンクリートの乾燥収縮は、用いないプレーンコンクリートより明らかに小さく、材令 26 週までの結果では、その割合はおおよそ 10% である。なお、蒸気養生、標準養生とも収縮低減材による収縮の低減効果は大差がない。なお、富配合コンクリートでは水セメント比は小となるが、コンクリート中のセメペースト量が

表-2.3.23 コンクリートの乾燥収縮におよぼす収縮低減材の影響

セメント の 種 類	単 セメント 量 (kg)	収縮低減材 の 単 位 量 (kg)	養生条件	乾燥材令と収縮ひずみ ( $\times 10^{-4}$ )						26 週 に おける比率
				3 日	1 週	2 週	4 週	8 週	26 週	
普 通	350	0	標 準	1.28	2.39	3.48	5.15	7.26	10.00	100
	322	28		0.91	1.45	2.56	4.41	5.94	8.74	87
	350	0	蒸 気	1.04	1.80	2.65	4.12	6.52	9.37	100
	322	28		1.16	1.56	2.29	3.90	5.74	8.37	89
	450	0	標 準	1.53	2.46	3.79	5.39	7.55	10.18	100
	414	36		1.04	2.06	3.30	4.50	6.14	8.75	87
	450	0	蒸 気	1.26	2.24	2.86	4.17	6.78	9.45	100
	414	36		1.04	1.60	2.50	4.10	6.01	8.63	91
早 強	350	0	標 準	1.43	2.35	3.30	5.08	6.70	8.75	100
	322	28		1.38	2.36	3.24	5.06	6.45	8.27	94
	350	0	蒸 気	1.34	1.79	2.70	4.21	6.10	8.25	100
	322	28		1.19	1.62	2.32	3.63	6.00	7.95	96
	450	0	標 準	1.66	2.32	3.51	5.34	7.41	9.83	100
	414	36		1.75	2.45	3.43	5.12	6.49	8.66	87
	450	0	蒸 気	1.37	2.13	3.38	4.98	6.74	9.05	100
	414	36		1.38	2.08	2.93	4.32	6.00	8.21	91

注) 供試体: 10×10×40cm はり 3個 の平均値、温度 20℃、相対湿度 50%

増加するので乾燥収縮は多少大となっており、富配合のほうが収縮低減材の効果がいくぶん高くなっている。一家ら<sup>344)</sup>の研究によると、建築用のスランプ 21cm のやわ練りコンクリートで収縮低減材を 7% 代替した場合、用いないものより 30% 低減されているが、単位水量の

少ないかた練りコンクリートになるとその効果は少なくなると考えられる。齊藤らは、収縮低減材をセメントの5%代替した JIS モルタルを蒸気養生した場合、プレーンのモルタルに比べて乾燥収縮を約10%低減できたと報告しており、コンクリートで行なった本実験の結果と同程度の値となっている。

結局、収縮低減材を用いることによって蒸気養生したコンクリートの乾燥収縮は、用いないものに比べ約10%低減できるが、内割りで使用すると単位セメント量が減少するため強度はむしろ低くなる傾向がある。したがって、増量材を加えずに、セッコウ単味として、セメントの粉砕時に  $SiO_2$  で3%程度まで増したセメントを用いたほうが、蒸気養生としては有利な結果がえられるものと思われる。

#### (6) フライアッシュについて

火力発電所の微粉炭燃焼ボイラーから出る廃ガスの中からコットレル集塵機によって捕集したフライアッシュは、第3章、第2節に述べたようにフライアッシュセメントとして用いられるほか、代表的なコンクリート用混和材として市販され一般のコンクリート工事に使用されている。フライアッシュはその微粒子が球形であるためコンクリートのワーカビリティを改善するほか、ポズラン反応によってコンクリートの長期強度を改善し、その水密性を向上することができる。これは、フライアッシュ中のシリカやアルミナがセメントの水和によって生ずる水酸化石灰と常温で徐々に反応して不溶性の化合物をつくるためである（p.131参照）。

一般のコンクリート工事では、セメント量の10~20%を代替し、ダムコンクリートでは30%程度代替されている。なお、使用量の多い場合にはペーストとして使用するとよい結果がえられることが国分ら<sup>348)</sup>によって報告されている。

コンクリート製品では、細骨材の粒度の粗いのを補ったり、はだ面をよくするため外割で10~15%加えられることもある。また、蒸気養生を行なうとポズラン反応にも有利であると考えられ、本面(2)でも20%添加の場合について報告したが、ここではとくにフライアッシュのセメントに対する添加量と養生温度との関係について検討を行なった。<sup>298)</sup>

#### 1) 実験の概要

比重3.16、プレーン比表面積  $3300\text{cm}^2/\text{g}$ 、28日圧縮強さ  $424\text{kg}/\text{cm}^2$  の普通ポルトランドセメントを用い、表-2.3.2.4 に示す品質のフライアッシュをセメントに対して内割りで20%および40%使用した。粗骨材は最大寸法  $15\text{mm}$  の安倍川砂利、細骨材は相模川砂 ( $FM=3.12$ ) を用いた。

表-2.3.2.4 使用したフライアッシュの試験結果

化 学 成 分 (%)					物 理 的 性 質					
湿 分	ig. loss	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	比 重	プレーン値	88 $\mu$ 残分	単位水量比	圧縮強さ比(%)	
$H_2O$						( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	(%)	(%)	28日	91日
0.15	0.3	61.0	26.0	4.0	2.23	3610	0.4	93	89	102

コンクリートは目標スランブ  $5\text{cm}$ 、単位セメント量（フライアッシュを含む） $450\text{kg}$  の表-2.3.2.5 に示す配合とした。

表-2.3.2.5 実験に用いたコンクリートの配合

配 合 の 種 類	最大寸法 ( $\text{cm}$ )	スランブ ( $\text{cm}$ )	W/C+F (%)	s/a (%)	単 位 量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					備 考
					V	C	F	S	G	
プレーン	15	$5 \pm 1$	36.4	40	164	450	0	714	1079	—
フライアッシュ20%	15	$5 \pm 1$	33.8	40	152	360	90	710	1076	C:F=4:1
フライアッシュ40%	15	$5 \pm 1$	32.7	40	147	270	180	702	1043	C:F=3:2

蒸気養生条件は表-2.3.2.6に示すように、前養生を3種(2、4および6h)、最高温度を3種(65、80および95℃)にかえ、蒸気養生後は20℃の霧室で湿潤養生を行なった。なお、供試体寸法は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱形とし、材令1日、7日および28日で圧縮強度試験を行なった。

表-2.3.2.6 供試体の蒸気養生条件

最高温度	前養生期間	温度上昇速度	温度上昇期間	等温養生期間	冷却期間	全養生期間	マチ、リチー
65℃	2 (h)	(deg/h) 2.0	(h) $2\frac{1}{4}$	(h) $2\frac{3}{4}$	1.7 (h)	(h) 2.4	1050 (C・h)
	4				1.5		1000
	6				1.3		950
80℃	2	2.0	2	2	1.7	2.4	1200
	4				1.5		1140
	6				1.3		1080
95℃	2	2.0	$3\frac{3}{4}$	$1\frac{1}{4}$	1.7	2.4	1350
	4				1.5		1270
	6				1.3		1200

## 2) 実験結果とその考察

表-2.3.2.7にみられるように、フライアッシュを混入したコンクリートの脱型時の強度は養生温度が高いほど大で、ACI Committee 517 の報告<sup>181)</sup>にも指摘されているように感温性は大である。しかし、最高温度を高くすると長期材令への強度増進率が低下し、この傾向は混入量の多いほど顕著になるので、フライアッシュを使用する場合には、混入量は多くても20%程

図-2.3.2.7 フライアッシュの混入量をかえて蒸気養生したコンクリートの最高温度と圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

コンクリートの種類	1 日			7 日			2 8 日		
	65℃	80℃	95℃	65℃	80℃	95℃	65℃	80℃	95℃
ブ レ ー ン	32.9 (100)	35.5 (108)	36.4 (111)	44.7 (100)	46.2 (103)	42.2 (94)	54.8 (100)	56.3 (103)	52.7 (96)
フライアッシュ20%	30.4 (100)	32.6 (107)	34.4 (113)	41.3 (100)	39.5 (96)	37.7 (91)	63.4 (100)	50.3 (94)	45.2 (85)
フライアッシュ40%	24.5 (100)	29.7 (121)	32.4 (132)	34.3 (100)	33.7 (98)	33.8 (99)	48.1 (100)	42.5 (88)	38.9 (79)

注) 前養生2、4および6時間で養生した場合の平均値を示す

度までとし、蒸気養生の際の最高温度も80℃以下にするのが適当であると思われる。Withey<sup>349)</sup>は、ブロックにフライアッシュを使用する場合についてセメントの25%までの代替について検討し、蒸気養生温度72℃で養生したとき十分に使用できると報告している。しかし、フライアッシュは捕集方法によって品質がことなり、これがコンクリートの性質にきわめて影響するので、使用にあたっては品質のよいものを選ぶ必要がある。<sup>327)</sup>

コンクリート製品では、その外観検査を全数について行なうので、そのはだ面も重要視される。排水樋として用いる鉄筋コンクリートトラフを工場で製造する際に、単位セメント量320 kgの配合の普通セメントのコンクリートと、そのセメントの60 kgをフライアッシュで代替した配合のコンクリートとを打ち込み、そのはだ面を比較した結果、後者のフライアッシュコンクリートのほうがやや良好であった<sup>350)</sup>(第8章、第5節参照)。なお、単位セメント量を同一にしてフライアッシュを10%前後外割りで加えるとさらによいはだ面がえられるものと思われる。

結局、フライアッシュを用いたコンクリートの初期強度を高めるには、蒸気養生温度を高目にするのがよく、添加量は内割りで20%までが適当であり、製品の種類や所要強度にもよるが、良品のフライアッシュであれば十分に実用性のある混和材であるといえる。

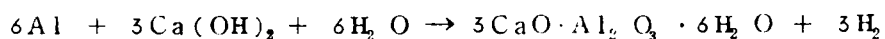
## (7) その他の混和材料について

コンクリート中にセメントの結晶核を入れると、再び結晶の生成が進んでコンクリート強度が増進されることは本節(3)でも述べたが、第5回の国際セメント化学シンポジウムにおいてSeligmann<sup>351)</sup>らはセメントの結晶核を2%混入することによって材令7日の強度を2.7倍高めることができたと報告しており、今後コンクリートの硬化促進のために注目すべき混和材であり、さらに研究を進める必要があると思われる。

このほかに混和材としては、微粉碎ケイ砂、スラグなどがあり、とくにオートクレーブ処理を行なう製品ではセメント量に対して30%程度のケイ砂の添加が強度改善にきわめて効果的であることが報告されている。<sup>352), 353)</sup>品質のよい鉱物質微粉末を蒸気養生製品に用いると、フライアッシュの場合と同様に、初期強度は劣るが、ワーカビリティやはだ面の改善、凍害抵抗性や水密性の向上、長期強度の増進などに有効である。Stolnikov<sup>206)</sup>らは、セメントとフライアッシュとスラグを35:25:40の割合で混合し、同時に粉碎し、粉末度をブレン比表面積で5000 cm<sup>2</sup>/g程度に細かくすると普通ポルトランドセメント以上の強度がえられると報告している。

近年、有機系の化学的混和剤のモルタルコンクリートへの利用が研究され、目的によって種類の混和剤が開発使用されており、<sup>354), 355)</sup>とくにAE剤、減水剤などの界面活性剤や塩化カルシウムで代表される促進剤はよく用いられる。有機系の促進剤としてはトリエタノールアミン塩があるが一般的には使用されていない。

特殊な目的でコンクリート製品に使用する混和剤としては、ガス発生剤、防水剤などがある。ガス発生剤はオートクレーブ処理によってとくに比重の小さい気泡コンクリート製品をつくる場合に使用され、一般に金属アルミニウム粉末を用いる。これは、アルカリの存在によってアルミ粉がつぎの反応式によって水素ガスを発生することを利用したものである。



普通、セメント量に対してわずか0.005~0.02%の範囲内で加えるが、所要の重量によって添加量をかえる。土木用の気泡コンクリートでは細骨材を加えてコンクリートの単位重量や強度を高くしている。また、ブレフォーム方式あるいはミックスフォーム方式で製品をつくる場合には、樹脂石けん、合成界面活性剤、加水分解蛋白質などの起泡剤を用いることもある。<sup>356)</sup>

水密性あるいは防水性を要するコンクリート製品では防水剤を用いることがある。防水剤は、モルタル、コンクリートの吸水性、透水性を減少し、逆に水密性、防水性を高めるために用いる混和剤で、建築用の防水ブロックを製造するときに使用されている。市販されている防水剤の種類はきわめて多く、<sup>323), 357)</sup>塩化カルシウムを主成分とするもの、ケイ酸ソーダを主成分とするもの、脂肪酸石けん、合成樹脂エマルジョン、パラフィンエマルジョン、アスファルトエマルジョン、AE剤と減水剤、鉱物質微粉末など、種類のタイプのものがある。これらの中には、防水性をますがコンクリートの硬化や強度発現を阻害するものもあるから使用にあたってはあらかじめ試験を行ない品質の確かなものを用いなければならない。

土木用製品でも、水密性を要求するものが多いが単位水量が少なく、水セメント比が小さいと水密性が向上するので、<sup>358)</sup>防水剤よりも良質のAE剤などの使用が推奨されており、<sup>314)</sup>良質のフライアッシュの使用も水密性の改善に効果的である。

結局、コンクリートの硬化促進のための各種の混和材料が研究され、開発されているが、現在、画期的なものが見出されておらず、塩化カルシウムに代り鉄筋をさびさせないでしかも蒸気養生の効果を高めるような製品用混和剤の開発が望まれる。

## (8) ま と め

市販の各種混和剤のうち、代表的なものを用い、蒸気養生の影響を調査し、製品用として適当な混和剤について検討した結果をまとめると、

1) 脱型強度の改善、養生時間の短縮など蒸気養生効果を高める混和材料としては、促進剤の塩化

カルシウム、良質の減水促進剤たとえばポゾリス<sup>16</sup>10などが適している

- 2) コンクリート製品の耐久性を改善するためにA E剤を用い蒸気養生を行なう場合には、普通コンクリートと同様に取り扱うことができるが、前養生時間をいくぶん長目にとり、最高温度はJISを上回らないようにするのがよい。
- 3) 良質の減水剤の使用も蒸気養生に効果的で、同じ脱型強度をえるのに単位セメント量の節約ができ、普通コンクリートと同じ養生条件の採用が可能である。
- 4) 硬化促進剤として塩化カルシウムを使用するとC<sub>3</sub>Sの水和を促進し、初期材令の強度をいちじるしく改善できるが、鉄筋が腐食される危険性があるので、鉄筋コンクリート製品ではセメント量に対して1%以下の使用とすべきである。ただし、ひびわれの発生しやすい製品、電食のおそれある製品、硫酸塩の作用を受ける製品、PC製品などには使用してはならない。
- 5) セッコウを基剤とする収縮低減材は、蒸気養生したコンクリートの乾燥収縮をおおよそ10%低減するが、セメントに代替し内割りで加えた場合には強度は加えないものより低くなる傾向がある。
- 6) フライアッシュを用いると、長期強度やはだ面の改善に有効であるが、セメントに代替すると初期強度が劣るので、代替率は20%以内とし、しかも前養生期間を長目に蒸気養生温度を高目にするのがよい。

コンクリート製品においても混和材料の特徴を生かした使用方法や養生方法を用いると、所要の品質のコンクリートをえることができるが、混和材料の種類はきわめて多くその性能も千差万別なので使用にあたっては調査、試験など十分な配慮が必要である。

#### § 4. 人工軽量骨材コンクリートの蒸気養生

##### (1) まえがき

骨材はコンクリート容積の70~75%を占める重要な使用材料であるが、結合材であるセメントペーストに比べて不活性な物質であるから蒸気養生を行なった場合、骨材自体の品質の影響は標準養生を行なったコンクリートに対する骨材の影響と同様であるとみなされている。すなわち骨材の粒形、粒度、最大寸法などの差異によって所要のコンシステンシーをえるに要する単位水量はもとより、ワーカビリティ、強度その他の性質がことなるので、第1編、第8章にも述べたが、これらの要因がコンクリートの性質におよぼす影響を十分に理解しておく必要がある。

わが国では、欧米に比べて急流河川が多く、骨材が豊富でとくにその品質も良好であったが、需要量の急激な増加と採取規制により、品質のやや劣る砂利のほか、砕石や人工軽量骨材も使用されるようになってきた。製品の軽量化の可能な人工軽量骨材は、製品工場でもとくに注目されており、建築用製品では一部すでに実用されているが、これを用いたコンクリートの蒸気養生に関する資料はきわめて少ない。

現在、わが国で市販されている人工軽量骨材には、第1編、第5章に述べたように製造方法によって分類すると造粒型と非造粒型があり、粗骨材の比重は1.1~1.4であるがそれぞれ粒形に特徴がある。また、人工軽量骨材を用いたコンクリートは川砂利あるいは砕石を用いたコンクリートに比べて熱伝導率が相当に小さい。したがって、人工軽量骨材コンクリートに対する蒸気養生の影響を調べるため、市販の造粒型と非造粒型との代表的な人工軽量骨材を用いたかた練りコンクリートを蒸気養生し、普通コンクリートと比較して検討した。<sup>100),359)</sup>

##### (2) 実験の概要

人工軽量骨材は第1編、第5章に用いたA社製の造粒型膨張頁岩(記号R)とB社製の非造粒型膨張頁岩(記号S)とを使用し、比較のための普通骨材は吉野川産の川砂利、川砂(記号N)でこれらの主な物理試験結果を示すと表-2.3.28のとおりである。軽量粗骨材は十分にブレウエッチングを行ない、軽量細骨材や川砂利と同様に表面乾燥飽水状態で使用した。川砂は気乾状

態（含水量＝0.26％）のものに有効吸水量を補正して使用した。

表－2.3.28 使用骨材の物理試験結果

骨 材 の 種 類	造粒型R骨材		非造粒型S骨材		普通骨材	
	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材
表 乾 比 重	1.37	1.92	1.24	1.90	2.62	2.62
吸 水 量 (%)	2.0	4.3	9.6	18.7	1.1	1.0
単位容積重量( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	870	1180	720	1010	1660	1680
粗 粒 率 (FM)	6.44	2.65	6.59	2.86	6.71	2.72

普通ポルトランドセメント（比重＝3.15、28日圧縮強さ $40.6 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ ）を用い、実験に用いたコンクリートの配合は、第1編、第5章、第3節の表－1.5.5（p.53参照）に示したものと同様で、振動締固め製品とPC製品を対象として、単位セメント量 $330 \text{ Kg}$ と $430 \text{ Kg}$ との2種とし、目標スランプは $1 \text{ cm}$ と $6 \text{ cm}$ とした。材料の分離を防ぎ、耐久性をますために人工軽量骨材を用いる場合はAEコンクリートにするのがよいとされているので、目標空気量を5%としたAEコンクリートも加えた。なお、人工軽量骨材コンクリートでは、粗、細骨材とも人工軽量骨材を用い、川砂は加えなかった。

容量 $50 \ell$ の強制練りミキサを用いて練り混ぜたコンクリートを、鋳鉄製の $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱形型わくに一層に詰めたるち、低振動数用の振動台のテーブルの上に6個の型わくを取り付け、振動数 $4000 \text{ vpm}$ 、振幅約 $1.0 \text{ mm}$ 、加速度 $9 \sim 10 g$ の条件で20秒間締固めを行なった。締固め終了後、上面に浮き出た粗骨材を押え込むようにして表面をならしたのち、型わく上面にガラス板をのせ、 $20^\circ \text{C}$ に保った蒸気養生そう（室内寸法： $65 \times 93.5 \times 60 \text{ cm}$ ）に移し、つぎの条件で蒸気養生を行なった。なお、蒸気養生中は養生室、供試体中心部などの温度を実測した。蒸気養生

前養生期間： $20^\circ \text{C}$ で3時間

温度上昇期間： $20^\circ \text{C}/\text{h}$ の上昇速度で2.5時間

等温養生期間： $70^\circ \text{C}$ で2時間

冷却期間： $3 \sim 5^\circ \text{C}/\text{h}$ の冷却速度で12.5時間

後は $20^\circ \text{C}$ の恒温室に移し、キャッピングを行ない翌日脱型し、所定材令まで $20^\circ \text{C}$ 水中養生を行なった。

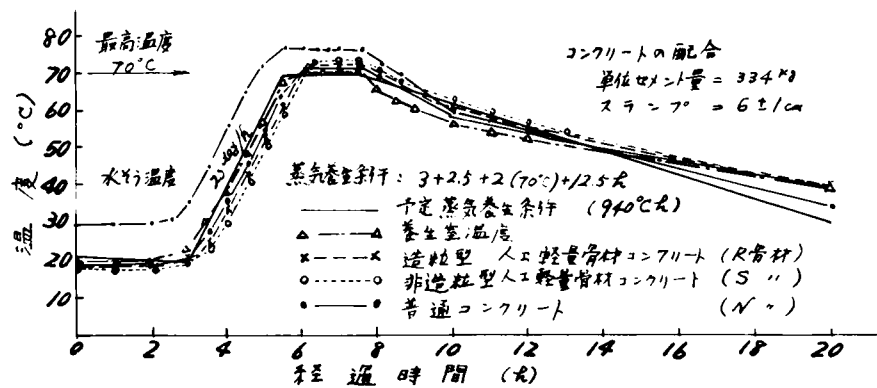
蒸気養生した供試体は1日、7日および28日、標準養生を行なったものは7日および28日で、ヤング率測定器により一次共振周波数を求め動弾性係数を算出したのち、圧縮強度試験を行なった。なお、各材令の供試体数は3個とした。

### (3) 実験結果とその考察

#### 1) 供試体中心部の実測温度について

蒸気養生中の室温、水温および供試体中心部の温度履歴の測定結果の一例を図－2.3.22に示す。この蒸気養生そうはヒーター（ $1.5 \text{ kW} \times 2$ 、3段階（ $0.5 \text{ kW}$ ）切換え）で水を加熱し室温を上昇するもので、温度上昇の際には水温を室温より $15 \sim 20^\circ \text{C}$ 高くした。温度上昇期間中は熱が型わくからコンクリートに移行するので供試体中心部の温度は室温より明らかに遅れ、その温度差は軽量コンクリートで $8 \sim 10^\circ \text{C}$ 、普通コンクリートで $5 \sim 6^\circ \text{C}$ であり、時間的にはそれぞれ $30 \sim 35$ 分および $15 \sim 20$ 分程度の遅れである。最高温度に近づくとその差は小となり、等温養生期間の初期に室温においつくが、この時期は富配合コンクリートほどはやくなる。これから後は供試体中心部の温度が高くなり、室温との差は等温養生中は軽量コンクリートで $2 \sim 5^\circ \text{C}$ の値である。徐冷に移るとこの差は大となり軽量コンクリートで $6 \sim 10^\circ \text{C}$ 、普通コンクリートで $4 \sim 5^\circ \text{C}$ 室温より遅れて冷却され、養生終了時の20時間で

図-2.3.22 蒸気養生室と供試体中心部の温度測定結果の一例



はコンクリート中心部と室温とはほぼ同じ温度となる。

加熱時に軽量コンクリートの温度上昇が普通コンクリートより遅れ、徐冷の際には逆に軽量コンクリートの温度が普通コンクリートより高いのは、前者は後者より熱伝導率が小さく、比熱が大きいので熱保持のよいためで、この傾向は比重の小さいS骨材コンクリートのほうが顕著である。なお、村田ら<sup>87)</sup>は軽量コンクリートの熱特性として表-2.3.29の値を示している。

表-2.3.29 人工軽量骨材コンクリートの熱特性<sup>87)</sup>

コンクリートの種類	普通コンクリート	非造粒型メサライトコンクリート
熱拡散率 $h$ ( $\times 10^{-5} m^2/h$ )	300 (100)	140 (47)
熱伝導率 $k$ ( $kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$ )	2.1 (100)	1.0 (48)
比熱 $c$ ( $kcal/Kg \cdot ^\circ C$ )	0.26 (100)	0.41 (158)

また、0°Cを基準としてマチュリチーを求めると普通コンクリート $940^\circ C \cdot h$ 、造粒型のR骨材コンクリート $945^\circ C \cdot h$ 、非造粒型S骨材コンクリート $955^\circ C \cdot h$ となり予定マチュリチーと大差なく、わずかに軽量コンクリートが大となる傾向がある。なお、この蒸気養生条件では、脱型時、供試体の側面にひびわれの発生は認められなかった。

## 2) コンクリートの圧縮強度について

2種の人工軽量骨材コンクリートと普通コンクリートを蒸気養生および標準養生し、圧縮強度と動弾性係数を求めた結果を表-2.3.30に示す。試験値の変動係数は大多数の値が1~6%であり、蒸気養生を行なった場合平均3.2%、標準養生のほうは3.1%である。また、軽量コンクリートの変動係数は普通コンクリートよりやや小であったが、これは骨材の管理のよかったためと思われる。

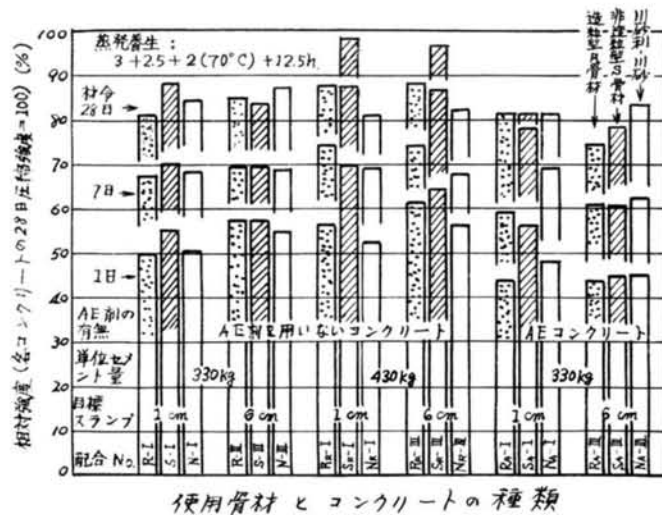
表-2.3.31にみられるように、骨材の種類、セメント量、コンシステンシー、AE剤の有無、などによって各材令のコンクリートの強度発現はかなりことなり、蒸気養生を行なった軽量コンクリートの脱型時の1日強度は、AE剤を用いない単位セメント量330 Kgのスランブ1cmと6cmの配合で、造粒型のR骨材の場合それぞれ $189 Kg/cm^2$ と $175 Kg/cm^2$ 、非造粒型のS骨材では $185 Kg/cm^2$ と $181 Kg/cm^2$ の脱型に十分な値がえられている。一方、普通コンクリートでは $229 Kg/cm^2$ と $211 Kg/cm^2$ となっている。なお、標準養生の結果と比較して蒸気養生効果を判断するために28日標準強度に対する蒸気養生各材令の強度比すなわち相対強度を示すと図-2.3.23のとおりである。材令1日の単位セメント量330 Kgのブレーションコンクリートでは、そ

表-2.3.30 蒸気養生および標準養生した各種コンクリートの圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) と動弾性係数 ( $E_D$ )

コンクリートの種類				蒸気養生						標準養生			
AE 剤 の有無	単位 セメント (kg)	目標 スランプ (cm)	配合	材令 1 日		7 日		28 日		7 日		28 日	
				$E_D$ ( $\times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_D$ ( $\times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_D$ ( $\times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_D$ ( $\times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_D$ ( $\times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Non	530	1	R-1	2.03	189(27)	2.09	258(06)	2.23	508(14)	2.10	246(14)	2.35	580(37)
			S-1	1.54	185(06)	1.61	234(16)	1.67	294(10)	1.56	224(06)	1.75	333(64)
			N-1	3.38	229(56)	3.79	310(40)	3.90	585(07)	3.72	301(27)	4.09	454(54)
Non	530	6	R-2	18.8	181(39)	19.9	219(35)	2.15	267(39)	2.02	207(15)	2.27	314(48)
			S-2	15.1	175(11)	15.4	211(46)	1.65	254(15)	1.57	195(15)	1.71	303(26)
			N-2	31.2	211(07)	35.0	263(16)	3.75	554(32)	3.35	225(53)	3.82	583(37)
Non	430	1	R-3	21.8	270(17)	2.29	358(62)	2.40	421(40)	2.36	372(32)	2.54	479(43)
			S-3	17.3	293(12)	18.2	370(38)	1.90	411(38)	1.77	318(24)	1.97	418(85)
			N-3	35.9	314(11)	39.8	411(14)	4.12	483(53)	4.06	453(34)	4.52	594(12)
Non	430	6	R-4	20.4	257(23)	2.09	308(44)	2.24	366(31)	2.20	338(17)	2.30	415(17)
			S-4	16.8	242(35)	1.78	324(79)	1.80	357(47)	1.70	294(51)	1.91	373(41)
			N-4	35.1	308(31)	3.75	370(30)	4.04	449(11)	3.64	396(26)	4.15	545(02)
A E	530	1	R-5	18.0	137(07)	19.3	186(51)	2.06	254(20)	1.96	208(41)	2.14	311(11)
			S-5	14.1	167(51)	15.4	232(23)	1.59	241(60)	1.45	193(22)	1.62	295(34)
			N-5	30.1	201(75)	3.27	288(13)	3.49	337(47)	3.24	275(31)	3.72	415(21)
A E	530	6	R-6	17.4	132(0)	18.8	183(28)	1.99	224(50)	1.85	175(22)	2.15	299(08)
			S-6	13.7	124(06)	14.6	167(56)	1.54	217(17)	1.39	158(16)	1.63	275(10)
			N-6	29.4	184(54)	3.31	253(53)	3.59	338(10)	3.04	243(21)	3.80	404(21)

※ ( ) 内は供試体 3 個の圧縮強度の変動係数 ( % )

図-2.3.23 各種コンクリートの標準養生 28 日の圧縮強度に対する  
蒸気養生したコンクリートの各材令の強度比 ( 相対強度 )



れぞれ R 骨材で 50、55 %、S 骨材で 55、60 %、普通骨材では、50、55 % となり、既往の研究結果 (p.122 参照) と大差ない値を示している。28 日強度に比べて脱型時では S 骨材の強度発現が比較的よいのは、蒸気養生中の熱保持の効果がよいためではないかと思われる。Hanson<sup>203)</sup> も、軽量コンクリートは熱保持のよいため脱型時の強度発現に有利であると述べている。材令 28 日の軽量コンクリートの相対強度は、単位セメント量 330 Kg の配合では普通コンクリートの値と大差ない。

富配合の軽量コンクリートでは、各材令の相対強度が普通コンクリートより高く、とくに S 骨材を用いた場合に顕著であるが、これは高強度コンクリートになると軽量骨材自体の強度が低いため、標準養生 28 日強度の伸びなやみの影響があるためと考えられる。これは、セメン



ト100Kgの増量による強度増加を調べると、上記2種のスランブのコンクリートの材令28日の平均値で、普通コンクリートが149 Kg/cm<sup>2</sup>あるのに対し軽量コンクリートはR骨材で100Kg/cm<sup>2</sup> S骨材で78 Kg/cm<sup>2</sup>の結果がえられていることでも明らかである。

また、AEコンクリートでは、スランブ、材令、骨材の種類などによって相対強度にややばらつきがあるが、これは連行空気量の変動も影響しているのではないと思われる。すなわちAEコンクリートでは、連行空気量の多い場合、相対強度が低くなる傾向があり、蒸気養生を行なう場合には目標空気量をやや低目にするのがよいと考えられる。

なお、普通コンクリートと軽量コンクリートとの圧縮強度を比較すると、材令28日ではR骨材で普通コンクリートのおおよそ80~90% S骨材では75~85%であり、AEコンクリートになるとこの比がやや低くなっている。蒸気養生を行なったコンクリートの材令1日から28日への強度増進率を求めると表-2.3.31のようになり、骨材の種類によって大差はみられない。

表-2.3.31 蒸気養生を行なったコンクリートの強度増進率

骨材の種類	目標スランブ (cm)	NonAE330Kg		NonAE430Kg		AE 330Kg	
		1日	28日	1日	28日	1日	28日
人工軽量骨材 (R)	1±0.5	100	164	100	151	100	185
	6±1	100	152	100	143	100	170
人工軽量骨材 (S)	1±0.5	100	159	100	141	100	144
	6±1	100	141	100	147	100	175
川砂利・川砂 (N)	1±0.5	100	170	100	154	100	167
	6±1	100	159	100	145	100	185

長野<sup>204)</sup>の造粒型のライオナイトを用いた実験でも、蒸気養生効果は川砂利、川砂の場合と同程度であると述べている。

#### (4) ま と め

造粒型および非造粒型の代表的な人工軽量骨材を用いたかた練りコンクリートに対する<sup>蒸気</sup>養生の影響を検討した結果をまとめると、

- 1) 蒸気養生を行なったコンクリートの強度発現の極相は配合によって多少ことなるが、人工軽量骨材を用いたコンクリートでも、普通コンクリートと少くとも同程度の蒸気養生効果がえられる。
- 2) 造粒型および非造粒型の骨材とも蒸気養生の効果は大差ないが、材令1日における標準養生28日に対する相対強度は比重が小さく、熱保持効果のよい人工軽量骨材(S)のほうがわずかに高くなる傾向がある。
- 3) AE剤を用いたコンクリートでは、普通コンクリートに比べて連行空気量の多い場合には相対強度が低くなる傾向があるので、蒸気養生を行なうコンクリートでは目標空気量をやや少なくするのがよい。
- 4) 軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて、加熱中は供試体中心部の温度上昇が遅れるが、逆に、冷却期間では6~10deg温度が高くなり熱保持の効果は大となる。

### § 5. セメント水比とセメント量の影響

#### (1) ま え が き

コンクリート製品に用いる配合は、その所要の強度、耐久性、水密性などの品質や製品の製造方法によってもかなりことになっており、主な製品に要求される配合と品質とを示すと表-2.3.32のとおりである。<sup>361),362)</sup>

表-2.3.32 製品に用いるコンクリートの配合と圧縮強度

コンクリート製品の種類		粗骨材最大寸法 (mm)	単位セメント量 (kg)	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
遠心力締 固め製品	ボール, パイル	30 ~ 10	400 ~ 520	45 ~ 37	3 ~ 10	400 ~ 500
	ヒューム管	25 ~ 10	370 ~ 540	50 ~ 37	3 ~ 8	350 ~ 480
	スパンパイプ	20 ~ 10	400 ~ 440	43 ~ 38	3 ~ 7	400 ~ 450
振動締固 め製品	矢板, フリューム管	25 ~ 15	300 ~ 400	50 ~ 38	2 ~ 8	300 ~ 450
	道路用製品	25 ~ 15	320 ~ 370	50 ~ 40	2 ~ 8	320 ~ 420
	無筋ブロック	30 ~ 20	240 ~ 300	55 ~ 45	2 ~ 6	200 ~ 300
	セグメント	*25 ~ 20	380 ~ 450	45 ~ 35	2 ~ 6	450 ~ 550
PC製品	はり, パイル, まくら木	*30 ~ 15	420 ~ 500	45 ~ 32	2 ~ 6	450 ~ 600
即時脱型 製品	まくら木	*25 ~ 15	420 ~ 400	40 ~ 30	0	500 ~ 600
	無筋コンクリート管	20 ~ 15	280 ~ 350	40 ~ 34	0	350 ~ 450
	フィルター管	15 ~ 10	400 ~ 450	25 ~ 20	0	—
	ブロック類	25 ~ 15	230 ~ 300	45 ~ 35	0	250 ~ 350
建築用 製品	プレハブパネル, スラブ	25 ~ 20	300 ~ 350	45 ~ 35	0 ~ 5	300 ~ 400
	ブロック	25 ~ 15	220 ~ 280	45 ~ 35	0	250 ~ 300

\* 早強ポルトランドセメントを用いることが多い

一般に、土木用製品では、高強度を必要とするものが多い、型わく養生期間を短縮したい、取扱中の不良品を少くしたい、などの要求から、通常、単位セメント量の多いコンクリートが用いられ、工場によっては経験的配合によっている例もある。したがって、品質がよく経済的なコンクリートをつくるためには、最適の材料を選び、単位セメント量、単位水量、水セメント比などの配合と圧縮強度との関係を調べて、所要の品質に応じた適正配合を選定しなければならない。とくに、所要強度から配合を決める場合、セメント水比と圧縮強度との関係を求めておく必要があり、製品では蒸気養生を行なうので、両者の関係におよぼす蒸気養生の影響について明らかにしておかなければならないが、この点まだ研究されていない。また、製品の製造の際に、蒸気養生期間を短縮し、早期脱型を行なうにはセメントの増量が効果的であると考えられるが、これに対する蒸気養生の影響を明らかにしておけば、コンクリートの所要強度が不足したり、配合がよすぎる場合、セメント量を加減することによって容易に配合の修正が可能になる。

したがって、ここでは水セメント比、単位セメント量などを変えたコンクリートを蒸気養生し、配合に対する蒸気養生の影響について標準養生の結果と比較して検討を行なった。<sup>299), 363)</sup>

## (2) 実験の概要

普通セメント(比重=3.16、ブレン比表面積=3230 cm<sup>2</sup>/g)および早強セメント(比重=3.13、ブレン比表面積=4200 cm<sup>2</sup>/g)とを用いた。粗骨材は安倍川産で最大寸法25 mmのもの、細骨材は荒川産のあら目の砂(5~0.6 mm)と鬼怒川産の微砂(0.6 mm以下)とを混合し、粗粒率がおおよそ2.75になるよう粒度調整を行なって用いた。

コンクリートの配合は、PC製品を含めた広範囲の工場製品を対象として、単位セメント量を300 Kg、350 Kg、400 Kgおよび450 Kgの4種とし、水セメント比を32~50%範囲で4種にかえ、目標スランブは2~4 cmのかた練りとした(表-2.3.33参照)。なお、細骨材率はセメント量の少ないものから43%、42%、41%および40%とした。

コンクリートは容量50ℓの可傾式ミキサを用いて練りませ、φ10×20 cmの円柱形型わくに振動数8000vpmの棒形振動機を用いて成形した。成形後、ただちに表-2.3.33に示す条件で蒸気養生を行ない、後養生を行なったのち、脱型時、7日および28日で圧縮強度試験を行ない、セメント水比や水セメント比と強度、単位セメント量と強度などの関係におよぼす蒸気養生の影響

表 - 2.3.3.3 使用コンクリートと蒸気養生条件

使用 セメント	コンクリートの配合 スランブ (cm)	水セメント比 (%) C=300, 350, 400, 450 kg	成形温度 (°C)	蒸気養生条件		蒸気養生後		蒸気養生 しないもの (普通養生)
				前養生+*上昇+等温+冷却 期間 (hr), (最高温度 °C)	養生度時 (°C・hr)	7日まで	7日以後	
普通	2~4	48.7, 42.3, 37.0, 34.0 48.7, 42.3, 37.0	20	2+2+3+3 (60)	435	20°C水中	20°C湿空	20°C水中
				2+3+2+3 (80)	515	"	"	"
早強	"	49.3, 43.4, 39.5, 36.5 49.3, 43.4, 39.5	"	1+2+2+3 (60)	355	"	"	"
				1+3+1+3 (80)	415	"	"	"

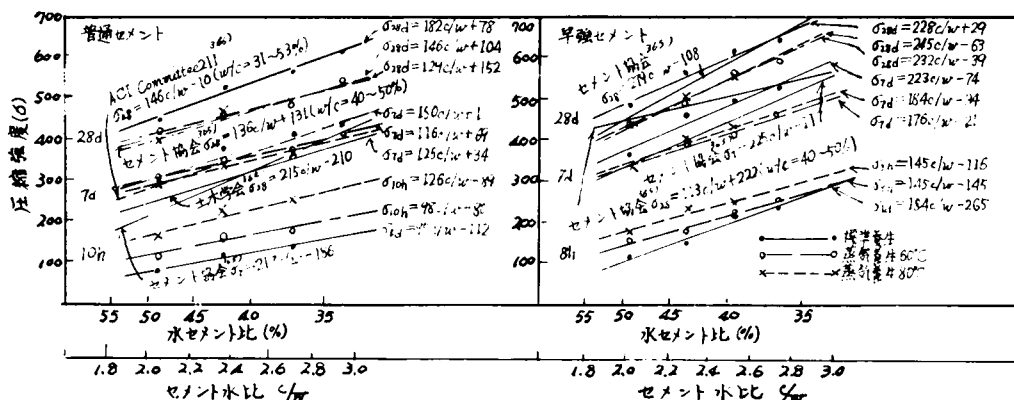
\* 温度上昇速度 20deg/h, 相対湿度 70~85%

等を調べた。

### (3) 実験結果の考察

- 1) 蒸気養生を行なったコンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係を、標準養生の結果と比較して図-2.3.24に示す。この結果に明らかなように、両者とも直線の勾配はほぼ同様で、セメント水比の増加による強度増加率は大差ない。脱型時では、蒸気養生の $\sigma - C/W$ 線が標準養生より高いが、材令7日では大差なく、早強セメントではむしろ標準養生のほうが大となり、

図-2.3.24 20°Cで成形した製品用コンクリートのセメント水比と圧縮強度との関係



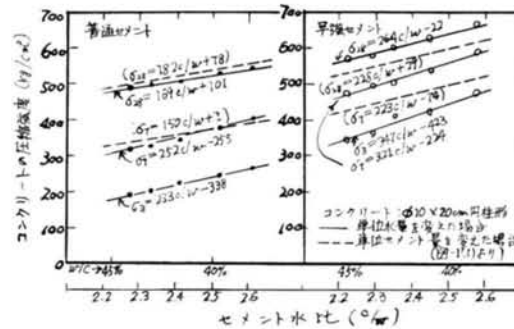
材令28日では同じセメント水比の場合、標準養生の強度が蒸気養生よりおよそ10~15%大きい。また、蒸気養生の際の養生温度を60°Cおよび80°Cとした場合の結果を比較すると、材令7日および28日の $\sigma - C/W$ 線はほとんど同じ結果がえられている。したがって、標準養生の $\sigma - C/W$ 線が求まっておれば、蒸気養生の結果は10~15%低い値、安全側をとればおよそ15%減の値を想定すればよいことになる。

なお、セメント水比と強度との関係は、セメントの品質はもとより、混和剤の種類と使用量、骨材の種類と品質、締固め方法、成形温度、養生条件などによってかなり相違するので、実際の工場で十分に調査し、信頼できる $\sigma - C/W$ 線を使用しなければならない。とくに、5°C成形で蒸気養生した場合も $\sigma - C/W$ 線を求めた結果<sup>299)</sup>、低温成形すると長期への強度の伸びがよくなるので、20°C成形の場合に比べて、標準養生との差が小となり、とくに蒸気養生効果のよい塩化カルシウムを加えるとこの傾向が顕著になっている。

つぎに、一般にセメント水比と圧縮強度との関係は、同一コンシステンシーで、単位水量をかえて求めるが、単位セメント量を320 Kgの一定とし、スランブ2~11 cmの範囲内で単位水量をかえたコンクリートについて圧縮強度試験を行ない、セメント水比と強度との関係を示すと

図-2.3.25 のようになり、1 次式で与えられる。これを図-2.3.24 の結果と比較すると、セメントの品質が相違するために強度の絶対値はことなるが、直線の勾配は両者ほぼ同様であり、ワーカビリティのよいコンクリートの圧縮強度は、セメントペーストの濃度ときわめて密接な関係のあることを示している。なお、Lone Star 社の水セメント比を一定としスランブを広範囲にかえ圧縮強度を試験した研究結果<sup>367)</sup>によると、スランブが 15 cm 程度より大きくなると同一水セメント比でも強度は低下する傾向を示している。

図-2.3.25 単位セメント量を一定とし、単位水量をかえた場合の水セメント比と圧縮強度との関係



#### 1) 水セメント比と圧縮強度との関係

実験に用いたコンクリートの水セメント比の範囲が比較的狭いので、水セメント比と圧縮強度との関係を示すと図-2.3.26 のように直線で示すことができる。横道からも、<sup>75), 76), 368)</sup> 水セメント比 50 以下コンクリートでは  $\sigma - w/c$  線は 1 次式になると報告している。かた練りで水セメント比の範囲の狭い製品用コンクリートでは、 $\sigma - w/c$  線を用いるのも実用上便利であると思われる。

図-2.3.26 かた練りコンクリートの水セメント比と圧縮強度との関係

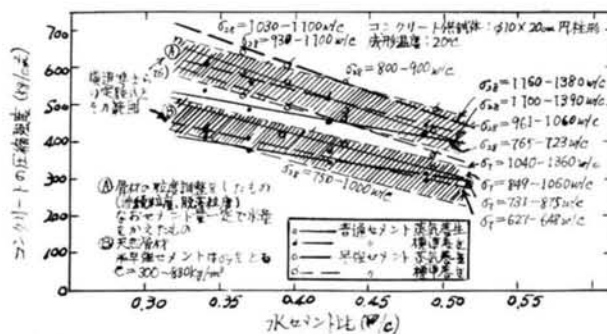
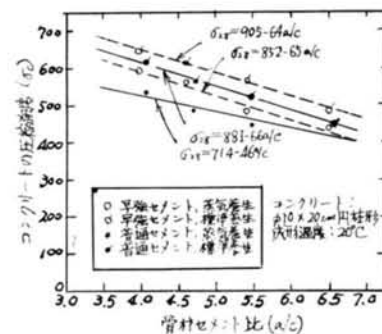


図-2.3.27 骨材セメント比と材令 28 日の圧縮強度との関係



なお、Erntroy らは、<sup>140)</sup> コンクリートの強度は水セメント比のみならず骨材セメント比に関係すると報告している。本実験による骨材セメント比と圧縮強度との関係を示すと図-2.3.27 のようになり、両者の関係も 1 次式で示される。しかし、コンシテンシーがほぼ同じコンクリートであれば、一定単位水量の法則によりコンクリート中の単位水量がほとんど変わらず、その骨材量はセメント量によって支配されることになるので、セメント水比あるいは水セメント比と強度との関係をより重要視すべきであると思われる。

コンクリート製品では、ミキサで練り混ぜた直後と型わくに詰めて締固め成形したあととは、コンクリートの水セメント比のことなるものがあるのでこの点に注意しなければならない。<sup>14)</sup> 杉木の研究<sup>14)</sup>によると、遠心力締固めコンクリートの水セメント比は、成形前と締固め終了後

とでは6～14%相違し、この低下率は水セメント比が大きいものほど顕著であると述べている。また、加圧コンクリート製品の場合、 $10 \text{ Kg/cm}^2$ で加圧すると、単位セメント量400 Kgの配合で、水セメント比37%のものが28.2%まで低下したと報告されている。<sup>369)</sup>さらに真空処理によっても水セメント比50%のコンクリートであれば30分の吸引によって、水セメント比は約12%低下すると報告されている。<sup>370)</sup>このような方法を用いた製品では、締固め後の水セメント比を考慮しなければならない。

したがって、工場では実際に用いられている材料や配合により、また締固め方法、養生条件なども実用のものとはほぼ同様にして水セメント比あるいはセメント水比と強度との関係を求め、コンクリート自体の品質のみならず、製品の実物試験の結果もあわせ考えて、もっとも経済的な配合を選定する必要がある。

### 3) 単位セメント量と圧縮強度

$\sigma - C/W$ 線を求めるため、単位水量がほぼ一定で単位セメント量を300、350、400 および450 Kgの4種にかえて圧縮強度を求めたので、両者の関係を表-2.3.34に示す。セメン

表-2.3.34 単位セメント量のことなるコンクリートの圧縮強度

セメント の種類	蒸気養生条件	単位セメント 量 (Kg)	W/C (%)	蒸気養生強度 ( $\text{Kg/cm}^2$ )			標準養生強度 ( $\text{Kg/cm}^2$ )	
				脱型時	7日	28日	7日	28日
普通	* 2+2+2+3 (60°C)	300	48.7	114	307	420	79	445
		350	42.3	165(41)**	347(40)	455(35)	112(33)	525(80)
		400	37.0	174(9)	378(31)	487(32)	138(26)	565(40)
		450	34.0	209(35)	413(35)	539(52)	165(27)	615(50)
早強	* 1+2+1+3 (60°C)	300	49.3	156	333	434	111	485
		350	43.4	177(21)	392(59)	483(49)	145(34)	563(78)
		400	39.5	224(47)	415(23)	563(60)	215(70)	615(52)
		450	36.5	257(33)	465(50)	592(29)	234(19)	646(31)

\* 前養生+温度上昇+等温+冷却期間

\*\* ( )セメント50 Kgの増量による強度増加量

ト50 Kgの増量に対し蒸気養生したコンクリートの28日強度は普通セメントを用いた場合32～52  $\text{Kg/cm}^2$ 、早強セメントでは29～60  $\text{Kg/cm}^2$ 増加している。一方、標準養生28日強度では、それぞれ40～80  $\text{Kg/cm}^2$ 、および31～78  $\text{Kg/cm}^2$ 、平均で55  $\text{Kg/cm}^2$ であり、標準養生したコンクリートに比べて蒸気養生したコンクリートはセメントの増量による強度増加量がおおよそ20%程度低減することを示している。これは、高温養生による長期材令におけるコンクリート強度の伸びの低下にも原因があると思われ、富配合コンクリートほどセメントの増量による強度増加量が少なくなる傾向がある。

なお吉野川産の川砂利、川砂を用いたコンクリートで行なった実験では(p.3.8参照)<sup>69)</sup>100 Kgのセメントの増量に対し、28日圧縮強度は平均108  $\text{Kg/cm}^2$ 高くなっている。したがって標準養生した川砂利コンクリートでは、セメント10 Kgの増量に対し28日強度でおおよそ10  $\text{Kg/cm}^2$ の強度増加が見込まれ、所要強度に対して配合を修正する場合の一つの目安とすることが可能である。また、碎石コンクリートでは川砂利コンクリートに比べてセメントの増量による強度増加、すなわちセメント効率がよくなっているが、これはセメント量が増加すると骨材の全表面を被覆するに十分なセメントペーストがえられ、粒子間摩擦が減少してワーカビリティがよくなり充てん率の向上すること、骨材のかみ合せが強化され密実なコンクリートのえられることなどのためと考えられる。

コンクリートを富配合にすることによってその強度をはじめ品質が向上し、はだ面もよくなるが、反面コンクリートのコストが増大すること、かた練りでは粘稠性をまし、練りまぜ、仕上

げなどがやや困難になることもあり、すでに述べたように、フライアッシュの一部代替や良質の減水剤の使用によるセメント使用量の節約を考慮する必要がある。

なお、コンクリートの配合が蒸気養生条件におよぼす影響については次章で述べる。

#### (4) ま と め

水セメント比、単位セメント量などの配合比に対する蒸気養生条件の影響を調べた結果をまとめると、

- 1) 蒸気養生したコンクリートでも、セメント水比説が成立し、材令 28 日の  $\sigma - C/W$  線は、常温成形のブレンコンクリートであれば、標準養生より 10 ~ 15% 低い値となり、直線の勾配はほぼ同様である。
- 2) 水セメント比の範囲が比較的狭いかた練りコンクリートでは、実用的に水セメント比と圧縮強度との関係も 1 次式で示すことができる。
- 3) セメント 10 kg の増量によって、標準養生した川砂利コンクリートの材令 28 日の圧縮強度は  $10 \text{ kg/cm}^2$  程度増加するが、蒸気養生を行なったコンクリートでは増加量がやや低下し平均でおよそ  $8 \text{ kg/cm}^2$  となる。

### § 6. 結 語

セメント、混和材料、骨材などの使用材料と、水セメント比、セメント量などの配合に対する蒸気養生の影響を検討した本章の結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 蒸気養生によってセメント組成物の水和反応が促進され、初期材令に高強度がえられるが、水和生成物の緻密な被膜の生成と安定化、その構造の不均一分布、空孔の増大などの理由により以後の水和が阻害され、長期材令への強度増進率が低下する。
- (2) 蒸気養生用セメントとしては、 $C_3S/C_2S$  比が大きく、粉末度がかなり高く、セッコウ量の多少多目の早強型のものが適している。市販セメントの中では早強セメントの使用が、養生期間が短縮でき、脱型強度が高くなって有利であり、超早強セメントは経済性の問題があるが養生期間の短縮にとくにすぐれている。
- (3) 普通セメント、混合セメントを用いたコンクリートでは、蒸気養生効果を高めるために、70 ~ 80 °C の高目の最高温度をとるのがよい。とくに、混合セメントでは前養生を多少長くする必要があり、初期強度発現が劣るので脱型を急ぐ製品では、蒸気養生の際のマチュリチーを大きくするが、促進剤の添加も考慮する必要がある。
- (4) 脱型強度の改善、養生期間の短縮など蒸気養生効果を高める混和材料としては、促進剤、減水促進剤などの使用が有利である。しかし、塩化カルシウムを使用する場合、鉄筋を腐食する可能性があるため、その選択や使用量については十分な配慮が必要になる。
- (5) AE コンクリートでは、目標空気量を低目にし前養生期間を長目に、最高温度を低目にするのがよい。良質の減水剤を使用する場合には、普通コンクリートと同じ条件で蒸気養生し、コンクリートの品質を向上することができる。
- (6) フライアッシュをセメントに代替して用いる場合には、前養生を長目にするのがよい。また、初期材令の強度が普通セメントを用いたものに比べて劣るので、蒸気養生温度を高目にし、代替率も 20 % 以下にするのが望ましい。
- (7) 人工軽量骨材コンクリートでは、造粒型骨材を用いたものも非造粒型骨材のものも同様に、普通コンクリートと少なくとも同程度の蒸気養生効果がえられる。
- (8) 蒸気養生を行なったコンクリートでもセメント水比説が成立し、 $\sigma - C/W$  線は標準養生より 10 ~ 15 % 低い値となる。また、セメントの増量による圧縮強度の増加も標準養生に比べていくぶん低い値となる。

## 第 4 章 蒸気養生条件の影響

### § 1. 緒 言

蒸気養生を行なう場合、コンクリートに対して有害な影響をさけるため、一般的ルールを守らなければならない。前養生期間、温度上昇速度、最高温度などの蒸気養生条件は、既往の研究で述べたように研究者によって見解が多少ことになっている。これは、使用材料、配合、試験条件などの相違のためと思われ、これらの点を考慮して再検討する必要がある。

まず、夏期と冬期とでは、コンクリートの成形温度はかなり相違し、とくに 1～2 月では 10℃ 前後になることも予想される。したがって冬期は凝結時間が長くなるので前養生期間を常温の 20℃ の場合より長くする必要があり、逆に夏期の高温時は凝結、初期硬化が早く、短縮が可能になると考えられる。蒸気養生に対する成形温度の影響とくに低温成形の場合についてはまだ研究されておらず、この点についてまず究明しなければならない。

前養生期間は、通常 2～4 時間が採用されているが、前述の成形温度はもとより、使用材料、配合のほか温度上昇速度とも関係し、温度上昇をきわめてゆるやかにすれば前養生期間は必要でないとされている。また、コンクリートのワーカビリティ、耐久性などの向上のため A E 剤を用いたコンクリートは空気が連行されるので、前養生期間の影響を考慮する必要がある。

蒸気養生の際の最高温度については、長期材令の品質を考慮し、わが国の JIS 製品では 65℃ までとしているが、米国でもこの値を上回る 66～79℃ を推奨しており、<sup>181), 187)</sup> 連、欧州などでは 80℃ 以上の高温を採用している例もある。<sup>236)</sup> わが国では、加圧蒸気養生を除いて、ごく高い温度の蒸気養生に関して検討した資料はきわめて少ないので、セメントの品質との関連も考慮して明らかにしなければならない。

養生室を所定の最高温度に保って等温養生を行なう期間を長くするとコンクリートの硬化が進み、短期材令の強度は高くなるが、最適蒸気養生期間を決定するためには、蒸気養生期間中のコンクリートの強度発現の状態も調査する必要があると思われる。また、所定の期間等温養生を行なったからの冷却期間の効果についてはまだ十分に究明されていないが、徐冷を行なう場合はコンクリート供試体の加熱が持続されるし、コンクリート中の湿分の損失がなければ等温養生に近い効果があると考えられる。

蒸気養生後は後養生として 3～7 日間の水中養生を行なうボール、パイルなどの製品もあるが、一般の製品では養生水そうの不足や早期出荷のため、蒸気養生後ただちに製品置場に移し、空中養生を行なっているものも多い。コンクリートが乾燥すると水和作用が停滞し、材令に伴う強度増進が期待できなくなるので、蒸気養生後できるだけ湿潤養生を行なうことが望ましい。蒸気養生後の養生条件がコンクリートの品質におよぼす影響を調べた結果はきわめて少なく、後養生の際の養生温度、水中養生期間などの養生条件の影響についても研究を進める必要がある。

したがって、本章では蒸気養生条件に関する問題点として、コンクリートの成形温度、A E コンクリートに対する前養生期間、最高温度、養生中の強度発現と冷却期間、後養生の際の養生条件をとりあげ、これらが主として圧縮強度におよぼす影響について実験研究を行ない、最後に第 3 章と第 4 章との研究結果をあわせ考えて最適養生条件について述べる。

### § 2. 成形温度が圧縮強度におよぼす影響

#### (1) まえがき

コンクリートの成形温度が強度におよぼす影響については マッサコンクリートを対象とした高野の研究<sup>230)</sup>があり、初めに低温度でつくつたモルタルのほうが高温でつくつたものより長期材令における強度増進が大となるが、これは、低温度でつくつたもののほうがセメント粒子の膨潤、ゲル状物質や結晶の析出、生長、

固化の程度が大であり内部の空けきが一層減少し構造が緻密、強固かつ均質になるためであると報告されている。逆に、高温で成形したものは、すでに述べたようにセメントの水和が急速に進み、初期材令の強度は大となる。したがって、最近、型わくの回転率を高め、ごく短時間で脱型するため、コンクリートの高温練りまぜも研究が行なわれており、製品工場でも実用されている例がある<sup>372)</sup>。しかし、高温で成形し養生した場合には蒸気養生も含めて長期材令への強度増進率が低下し、ある程度長期材令における潜在強度が犠牲になることを考慮しておかなければならない。

このように成形温度は、コンクリート強度と密接な関係があるが、蒸気養生を行なう場合の低温成形の影響についてはまだ研究結果がないので、5℃成形の場合について、早強セメント、促進剤などの使用も考慮し、20℃常温成形の場合と比較して検討を行なった。<sup>297)</sup>

## (2) 実験の概要

使用材料は前章、第3節(3)に示したものと同様に普通セメントと早強セメント(表-2.3.2 p. 134 参照)、安倍川砂利、荒川と鬼怒川との混合砂を用いた。使用したコンクリートの配合は表-2.4.1に示すように、目標スランブを3cmとし単位セメント量を3種にかえたものである。ブレンコンクリートでは5℃成形と20℃成形と同じ配合としたので、低温成形の場合はスランブがやや大となった。なお、低温成形では、促進剤として塩化カルシウムとボゾリス<sup>TM</sup>10も加えた。

表-2.4.1 使用コンクリートの配合と蒸気養生条件

成形温度 (℃)	材料 の名称	用材の 量 <sup>1)</sup> mm	目 寸 <sup>2)</sup> cm	配合 率 <sup>3)</sup>	単位 セメント 量 <sup>4)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 砂利 <sup>5)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 砂 <sup>6)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 水 <sup>7)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 空気 <sup>8)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 セメント <sup>9)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 砂利 <sup>10)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 砂 <sup>11)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 水 <sup>12)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 空気 <sup>13)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 セメント <sup>14)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 砂利 <sup>15)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 砂 <sup>16)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 水 <sup>17)</sup> kg/m <sup>3</sup>	単位 空気 <sup>18)</sup> kg/m <sup>3</sup>
20	普通	25	3±1		48.7 42.3 37.0	43 42 41	300 350 400	146 148 148	8.6 7.9 7.6	1.112 1.114 1.110									
20	早強	25	3±1		49.3 43.4 39.5	43 42 41	300 350 400	146 152 158	8.6 7.9 7.9	1.120 1.108 1.091									
5	普通	25	3±1		48.7 42.3 37.0	43 42 41	300 350 400	146 148 148	8.6 7.9 7.6	1.112 1.114 1.110									
5	早強	25	3±1		49.3 43.4 39.5	43 42 41	300 350 400	146 152 158	8.6 7.9 7.9	1.120 1.108 1.091									
5	普通	25	3±1		48.0 41.7 36.5	43 42 41	300 350 400	144 146 146	8.3 7.9 7.7	1.117 1.110 1.103									
5	早強	25	3±1		48.7 42.9 39.0	43 42 41	300 350 400	146 150 156	8.7 7.8 7.6	1.116 1.102 1.087									
5	普通	25	3±1	2.5±0.5	43.3 37.7 33.5	41 40 39	300 350 400	130 132 134	7.8 7.0 7.0	1.150 1.132 1.131									
5	早強	25	3±1	2.5±0.5	45.0 39.4 36.0	41 40 39	300 350 400	135 138 144	7.8 7.3 6.9	1.145 1.143 1.112									

使用材料は5℃と20℃の大型恒温室にあらかじめ貯蔵し、容量50ℓの可傾式ミキサを用いてその室温で練りまぜたのち、φ10×20cmの円柱形型わくに一層に詰め、振動数7500v.p.mの棒形振動機を用いて締め固めを行なった。供試コンクリートは成形後、型わくのまま養生そうに入れ、表-2.4.1に示す条件で蒸気養生を行なった。早強セメントや促進剤を用いたコンクリートは凝結時間が早くなるので前養生期間を短縮した。なお、温度上昇速度は20 deg/hとした。

蒸気養生後はそれぞれ成形温度と同じ恒温室に移し、表面仕上げを行なったのち、材令7日までそれぞれ20℃および5℃の水そうで養生し(水中養生期間5日)、以後は20℃および5℃の恒温室の空中(相対湿度70~85%)で養生を行なった。なお、比較のため蒸気養生を行なわないコンクリートについて5℃と20℃水中養生も行なった。蒸気養生を行なった供試体は脱型時(8~12時間)、7日および28日、蒸気養生を行なわないものは1日、7日および28日で圧縮強度試験を行なった。

## (3) 実験結果とその考察

蒸気養生を行なったコンクリートの各材令の圧縮強度試験結果を表-2.4.2に示す。この結果にみられるように、配合や養生条件によって、各材令の圧縮強度はかなりことなるが、脱型時に



表-2.4.2 コンクリートの圧縮強度試験結果

成形 温度 (℃)	蒸気 養生 条件	単位セメ ント量 (kg)	コンクリートの圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )					
			蒸気養生			蒸気養生しないもの		
			脱型時	7日	28日	1日	7日	28日
20	No.1	300	114 (25)	307 (69)	420 (94)	79 (18)	299 (67)	445 (100)
		350	165 (31)	347 (66)	455 (85)	112 (21)	347 (71)	525 (100)
		400	174 (31)	378 (67)	487 (87)	138 (25)	415 (72)	562 (100)
20	No.2	300	161 (36)	284 (64)	395 (89)	—	—	—
		350	224 (43)	340 (65)	465 (88)	—	—	—
		400	243 (43)	365 (65)	490 (87)	—	—	—
20	No.3	300	156 (32)	333 (69)	438 (90)	111 (23)	363 (75)	485 (100)
		350	177 (31)	392 (64)	483 (86)	145 (26)	462 (82)	563 (100)
		400	224 (36)	415 (67)	563 (91)	215 (35)	495 (80)	615 (100)
20	No.4	300	171 (35)	343 (69)	433 (88)	—	—	—
		350	231 (41)	407 (72)	504 (90)	—	—	—
		400	243 (40)	425 (69)	557 (91)	—	—	—
5	No.5	300	134 (32)	305 (74)	402 (97)	10 (2.4)	260 (63)	413 (100)
		350	160 (36)	315 (71)	439 (99)	12 (2.7)	288 (65)	443 (100)
		400	170 (33)	394 (75)	521 (99)	15 (2.9)	321 (61)	526 (100)
5	No.6	300	189 (38)	323 (65)	452 (91)	15 (3.0)	300 (60)	497 (100)
		350	220 (39)	355 (62)	494 (87)	19 (3.3)	347 (61)	570 (100)
		400	238 (40)	402 (68)	538 (91)	22 (3.7)	374 (63)	591 (100)
5	No.7	300	143 (35)	311 (75)	434 (105)	25 (6.1)	274 (66)	412 (100)
		350	198 (38)	406 (78)	503 (97)	50 (9.6)	382 (74)	518 (100)
		400	288 (48)	461 (77)	629 (103)	57 (9.5)	433 (73)	598 (100)
5	No.8	300	207 (41)	394 (78)	482 (96)	53 (11)	384 (76)	503 (100)
		350	270 (45)	489 (81)	578 (93)	74 (12)	500 (83)	605 (100)
		400	313 (49)	533 (83)	644 (100)	103 (16)	514 (80)	642 (100)
5	No.9	300	143 (29)	340 (69)	464 (94)	22 (4.4)	315 (64)	496 (100)
		350	203 (35)	426 (74)	573 (100)	33 (5.8)	387 (68)	574 (100)
		400	232 (37)	486 (77)	631 (100)	53 (8.4)	435 (69)	631 (100)
5	No.10	300	249 (45)	389 (70)	508 (91)	39 (7.0)	380 (68)	557 (100)
		350	276 (42)	444 (67)	555 (84)	59 (8.4)	454 (68)	664 (100)
		400	231 (49)	527 (68)	659 (97)	94 (14)	549 (81)	679 (100)

注) ( ) の数字、標準養生28日強度 (=100) に対する強度比すなわち相対強度

100 ~ 200 kg/cm<sup>2</sup>、材令7日で300 ~ 400 kg/cm<sup>2</sup>の値がえられており、比較的短時間の蒸気養生でかなりの養生効果がえられている。また、材令7日以後空中養生に移したが、材令28日にわたってかなりの強度増進が認められる。

#### 1) 蒸気養生に対する低温成形の影響

成形温度によって蒸気養生条件を少しかえたが、プレーンコンクリートについて、20℃成形60℃養生と5℃成形65℃養生との結果を比較すると表-2.4.3のようになる。まず、脱型時(8~12時間)の強度で判断すると、低温成形の場合セメントの凝結時間が長くなるので前養生を長くすると、20℃成形の場合と大差ない脱型強度がえられる。また、マチュリチーの

表-2.4.3 5℃および20℃成形し蒸気養生したコンクリートの圧縮強度

使用 セメント	単位 セメント量 (kg)	成形温度、養生条件とコンクリートの強度 $kg/cm^2$			
		脱型時 8h, 10h, 12h)		材令 28 日	
		20℃成形60℃養生	5℃成形65℃養生	20-60- 20℃水中、空中	5-65- 5℃水中、空中
普通	300	• 435℃・h $\sigma_{10h}$ -114(100)	400℃・h $\sigma_{12h}$ -134(118)	420 (100)	402 (96)
	350	" 165(100)	" 160 (97)	455 (100)	439 (97)
	400	" 174(100)	" 173 (99)	489 (100)	521 (103)
早強	300	355℃・h $\sigma_{8h}$ -156(100)	390℃・h $\sigma_{10h}$ -189(121)	434 (100)	452 (102)
	350	" 177(100)	" 220(124)	483 (100)	494 (101)
	400	" 224(100)	" 238(106)	563 (100)	538 (96)

• 脱型時のマチュリティー

• 材令7日まで水中、以後空中養生

大小でも論じられ、マチュリティーを大きくすれば、早強セメントのコンクリートにみられるように脱型時の強度は高くなる。つぎに、28日の強度で判断すると、蒸気養生後も5℃の低温で養生したにもかかわらず、20℃成形、養生の結果と大差なく、低温成形を行なうと強度発現はかえってよくなる傾向もみられる。また、低温成形は前養生期間が長くなるのでこれを短縮するためには、セメント重量に対して1%程度の硬化促進剤を用いると効果的であり、脱型強度も大となり表-2.4.2に示したように富配合コンクリートほど添加の効果は大きい。

なお、普通、早強、中庸熟、高炉などの各種セメントを用いたコンクリートを10℃および20℃で成形し、マッサコンクリートに類似した温度上昇を行ない材令3~7日間あるいは4~28日間、30~50℃の高温養生を行ない成形温度の影響を調べた結果、<sup>373)</sup> 初期材令では成形、養生温度が高いほど強度が高いが、材令が進むにつれてその差は小となり、また、普通セメントが他種セメントより初期温度の影響が顕著であるという結果がえられている。

## 2) 蒸気養生を行わないコンクリートの強度

5℃および20℃で供試体を成形後、蒸気養生を行わないで翌日脱型したのち、それぞれ20℃および5℃の水中養生を所定材令まで続けた場合の圧縮強度も表-2.4.2に示したが、20℃成形では普通セメントの単位セメント量300Kgの配合をのぞき、材令1日で100Kg/cm<sup>2</sup>以上の強度がえられている。しかし、5℃成形ではコンクリートの硬化とそれに伴う強度発現が遅れ、とくにブレンコンクリートでは初期強度がきわめて低く、初期に高強度をえるには促進養生を行なったり、早強セメントの利用、セメントの増量、促進剤の添加など配合を改善することのあることを示している。ブレンコンクリートでも材令7日でかなり強度増進がみられ、材令28日では20℃成形の結果に近い値を示しており、<sup>230)</sup> 高野の指摘しているように、低温で成形したものの方が以後の水和がよく進み初期より長期材令への強度増進率が大となっている。

## (4) ま と め

コンクリートの成形温度、とくに低温成形が蒸気養生を行なった場合の圧縮強度におよぼす影響をまとめると、

- 1) 低温の5℃成形では、20℃成形の場合に比べて前養生期間を多少長くし、温度上昇を20<sup>deg</sup>/h程度までにすれば、常温で成形し蒸気養生したコンクリートの強度と大差ない値がえられる。
- 2) 早強セメントの利用、セメントの増量、促進剤の添加などの配合の改善を行なえば、常温成形と大差ない前養生期間でよく、とくに促進剤をセメント量に対し1%程度添加すると、常温成形で蒸気養生を行なったブレンコンクリートより強度は大となる。
- 3) 蒸気養生を行わないブレンコンクリートを低温成形した場合、その初期強度は20℃成形に比べてきわめて低いが、材令が進むにつれて強度の伸びはよくなり、材令1日から7日、7日より28日への強度増進率は低温成形のほうが大である。

### § 3. 前養生期間がAEコンクリートの強度におよぼす影響

#### (1) 実験の概要

ワーカビリティ、耐久性などを向上するためにコンクリート製品用配合にもAE剤が用いられる傾向にあるので、これを用いたコンクリートの強度特性におよぼす前養生期間の影響についてブレーションコンクリートと比較して検討を行なった。<sup>329)</sup>

セメントは普通セメント（比重＝3.15、ブレーション比表面積＝ $3380 \frac{cm^2}{g}$ 、28日圧縮強度＝ $41.4 \frac{kg}{cm^2}$ ）を用いた。粗骨材は最大寸法10mmの安倍川砂利（比重＝2.64、吸水量＝1.2%、粗粒率＝6.07）と相模川砂（比重＝2.60、吸水量＝2.5%、粗粒率＝3.15）とを使用した。AE剤はピンソルレジン2%溶液を用いた。コンクリートの配合は、単位水量を少し多目として目標スランプ10～12cmとし、目標空気量4.0～4.5%のAEコンクリートと比較用にブレーションコンクリートも用いた（表－2.4.4参照）

表－2.4.4 使用したコンクリートの配合

コンクリートの種類	最大寸法(mm)	目標スランプ(cm)	目標空気量(%)	W/C(%)	S/a(%)	単位量( $\frac{kg}{m^3}$ )				単位AE剤量(cc)
						W	C	S	G	
AE	10	10～12	4.0～4.5	41.4	37	178	430	616	1064	1080
ブレーション	10	10～12	—	46.5	40	200	430	668	1019	—

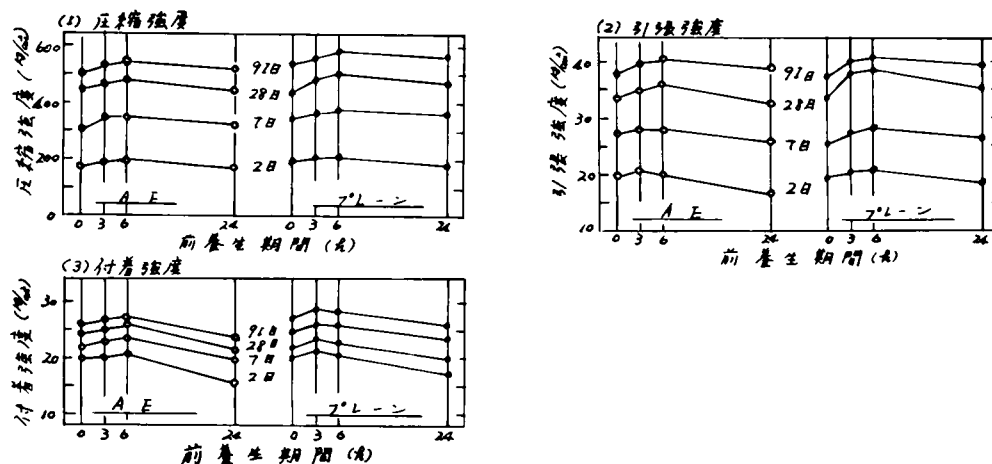
粗骨材の最大寸法を10mmとしたので、圧縮強度、引張強度、付着強度などの試験に用いる供試体は $\phi 7.5 \times 10$ cmの円柱形型わくを用いて作成した。付着強度試験用の鉄筋は径5.7mmで長さ37cmのもの（ $\sigma_{sy} = 54.2 \frac{kg}{mm^2}$ 、 $\sigma_{su} = 59.2 \frac{kg}{mm^2}$ ）を用い、5mm厚の円形の鉄筋支持版と支持わくで型わくの中央に固定してた。容量50ℓのドラムミキサで3分練りしたコンクリートを型わくに詰め、 $\phi 6$ mmの突き棒を用い、2層詰めで各層の突き数は15回として各供試体を成形した。

前養生期間の影響を調べるため0, 3, 6および24時間の4種にとり、型わくに詰めたまま蒸気養生そうで $15 \frac{deg}{h}$ の上昇速度で3時間で65℃の最高温度に高め、この時ヒーターを切りさらに2時間養生を行なったのち20℃の恒温室に移し、表面仕上げを行ない、2日、7日、28日および91日の各材令まで20℃の恒温室で養生し、所定材令で各強度の試験を行なった。

#### (2) 実験結果とその考察

前養生期間のことなる各実験シリーズ別に、それぞれ別の日に成形したのでバッチ間変動（標準養生28日の圧縮強度の変動係数でAEコンクリート1.6%、ブレーションコンクリート2.4%）を示したので、標準養生28日強度を用いてバッチ間変動を修正し、前養生期間がAEコンクリートおよびブレーションコンクリートの強度特性におよぼす影響を示すと図－2.4.1(1)～(3)のとおりである。

図－2.4.1 前養生期間がコンクリートの強度特性におよぼす影響



### 1) 前養生期間と圧縮強度との関係

図-2.4.1(1)にみられるように、AE剤を用いたコンクリートの場合も成形後数時間以内であれば、プレーンの場合と同様に前養生期間が長いほど強度は高くなる傾向があり、既往のプレーンコンクリートに関する研究結果<sup>218), 221)</sup>とほぼ一致している。なお、前養生期間を置く効果は、材令が長期になるほど顕著になる傾向があり、前養生期間を非常に長くしても圧縮強度に対しては悪影響が認められない。

### 2) 前養生期間と引張強度との関係

前養生期間3時間と6時間の試験結果が各材令とも高い引張強度がえられたが、Hansonの報告<sup>218)</sup>では、最適の前養生期間は5時間前後であると述べており、ほぼ一致した結果となっている。AEコンクリートとプレーンコンクリートの傾向はほぼ同様であり、材令91日では前養生期間6時間の場合がもっともよい結果を与えており、成形後前養生をとらないでただちに温度上昇した場合には、長期材令への強度増進率がやや劣ることを示している。

### 3) 前養生期間と付着強度との関係

最大引抜き荷重で求めた鉄筋とコンクリートの付着強度に対する前養生期間の影響は、他の強度特性と同様に3～6時間の前養生をとるのがよく、AEコンクリートでは6時間、プレーンコンクリートでは3時間養生が付着強度がやや大となっている。また、24時間前養生を行なったのち蒸気養生を行なったものは、前養生を行なわないものより低い値を示しており、付着強度に対する影響は圧縮強度や引張強度の場合とはややことなっていた傾向がみられる。これは、鉄筋の1部が露出されており鉄筋の加熱が早いこと、ある程度初期硬化が進んでからの蒸気養生は鉄筋とコンクリートとの接着面により影響を与えないためではないかと思われる。

結局、AE剤を用いたコンクリートに対する前養生期間の影響はプレーンコンクリートと大差なく、ほぼ同様に取扱ってよいが、各強度特性におよぼす影響よりみてAEコンクリートではやや前養生を長い目にするのが有利であるといえる。なお、減水剤を用いたコンクリートでも空気が進行されるものがあるが、単位水質が低減できしかも一歩に連行空気量が少ないので、遅延型の減水剤でなければ、混和剤の影響のところでも述べたように、プレーンコンクリートと全く同様に取り扱いことができると考えられる。

## § 4. 最高温度の影響

### (1) 実験の概要

蒸気養生の際の最高温度がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響について65℃、80℃、95℃の3種の温度をとり、セメントの種類や前養生期間をかえて検討した。<sup>298)</sup>

#### 1) 供試コンクリート

表-2.4.5に示す品質の普通セメントと早強セメントを用いた。粗、細骨材、フライアッシュ

表-2.4.5 使用セメントの性質

セメント の 種 類	化 学 分 析 結 果								物 理 的 性 質								
	主な化学成分(%)				組 成 鉱 物 ( % )				比重	ブレン 比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	凝 結			圧 縮 強 さ ( $\text{kgf}$ )			
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_4\text{AF}$			WC (%)	始 発 (h-m)	終 結 (h-m)	1日	3日	7日	28日
普 通	21.7	5.2	3.0	65.0	54.7	21.0	8.7	9.1	3.16	3330	25.4	2-50	3-37	—	120	241	424
早 強	21.2	4.8	2.8	66.0	65.4	11.5	8.0	8.5	3.13	4200	26.6	1-59	2-59	91	223	320	455

（普通セメントに内割り20%および40%混合）などは前章、第3節(6)に述べたものと同様である。コンクリートの配合は、ボール、パイル、ヒューム管などを対象とした単位セメント

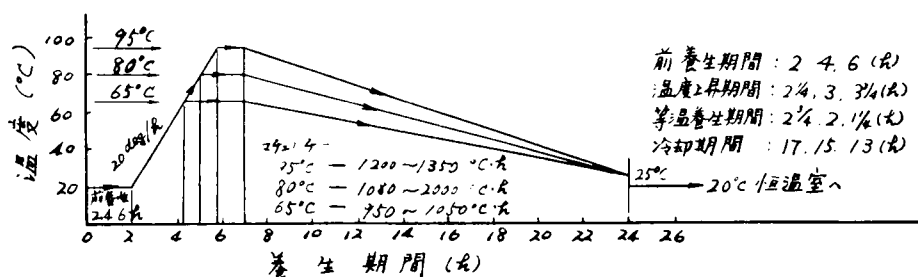
量450 kg、目標スランブ5 cmのもので、前章の表-2.3.27に示した配合のほか、早強セメントのコンクリート ( $W/C = 39.1\%$ 、 $S/a = 40\%$ 、 $W = 176\text{ kg}$ 、 $C = 697\text{ kg}$ 、 $S = 697\text{ kg}$ 、 $G = 1057\text{ kg}$ ) も加えた。

練りませは、可傾式ドラムミキサを用い、3分練りののち $\phi 10 \times 20\text{ cm}$ の円柱形型わくにコンクリートを一層に詰め、棒形振動機 ( $\phi 28\text{ mm}$ 、7500rpm) を用いて締固めを行なった。なお、練りませ、成形とも温度 $20^\circ\text{C} \pm 1\text{deg}$ 、相対湿度75~85%の恒温室で行なった。

## 2) 蒸気養生条件と試験

成形後、型わくのまゝ蒸気養生そうに入れ上面をガラス板でふたをして図-2.4.2に示す条件で蒸気養生を行なった。最高温度は $65^\circ\text{C}$ 、 $80^\circ\text{C}$ および $95^\circ\text{C}$ の3種とし、前養生の長いものはそれだけ冷却期間を短縮した。

図-2.4.2 コンクリート供試体の蒸気養生条件



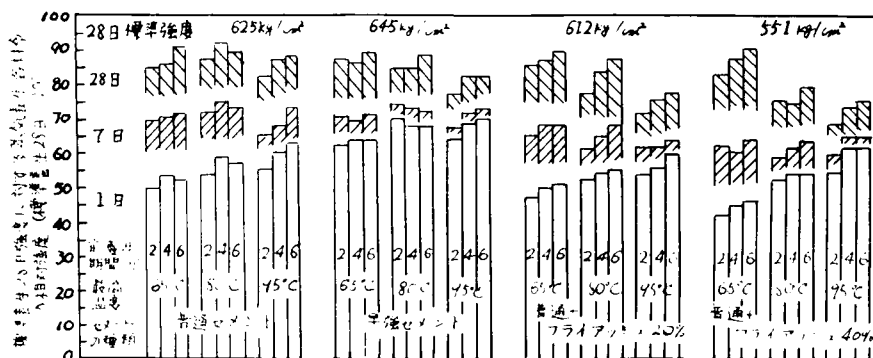
全養生期間24時間で蒸気養生を終了した供試体は、 $20^\circ\text{C}$ の恒温室に移し1日強度の試験を行なった。この場合、キャッピングは前養生期間中にセメントペーストで行なった。なお、材令7日および28日の供試体は、蒸気養生終了後キャッピングを行ない、翌日脱型して以後 $20^\circ\text{C}$ の霧室で養生し、所定材令で圧縮強度試験を行なった。

なお、各バッチの品質を検査し、蒸気養生の結果と比較するため、蒸気養生を行なわない標準養生供試体も作成し、材令28日まで $20^\circ\text{C}$ の霧室で養生した。

## (2) 実験結果の考察

各養生条件別にことなつた日に成形したので、各バッチごとにその標準養生28日の圧縮強度に対する各材令の蒸気養生を行なったコンクリートの強度比すなわち相対強度で試験結果を整理し、使用セメントと養生条件別に図-2.4.3に示した。蒸気養生を行なうことによって、材令1日で

図-2.4.3 蒸気養生したコンクリートの圧縮強度におよぼす最高温度と前養生期間の影響



注1) コンクリートの配合: 最大寸法: 15mm, 単位セメント量: 450kg, スランブ: 5±1cm  
注2) 全養生期間: 24h

標準養生 28 日強度の 45 ～ 65 % の値がえられているが、この割合は最高温度、前養生期間などの養生条件や使用セメントの種類によってかなり相違している。なお、各種コンクリートの標準養生 28 日強度の平均値は図 - 2. 4. 3 に示した。

#### 1) 最高温度の影響について

各種コンクリートについて最高温度別に相対強度を示した図 - 2. 4. 3 にみられるように、各種コンクリートとも脱型時の材令 1 日強度は、最高温度を高くしたほうが明らかに大である。最高温度を 65℃ から 95℃ まで上げることによって脱型時の強度は普通セメントを用いたコンクリートで 11 %、早強セメントを用いたものは 7 %、普通セメントにフライアッシュを 20 % 代替したもので 13 %、40 % 代替した場合にはとくに顕著で 30 % の増加を示している。既往の研究結果でもごく初期材令では最高温度が高いほど圧縮強度は高くなる傾向がえられている (p. 121 参照)。

材令 7 日になると最高温度の相違による強度差は小となり、材令 28 日では普通セメントを用いたコンクリートの 80℃ 養生の結果を除いて、同じ前養生時間であれば、最高温度が高いほど圧縮強度は低くなり、各コンクリートとも前養生 2 時間で 95℃ 養生がもっとも弱い値を示している。

最高温度別に材令と圧縮強度との関係を示した図 - 2. 4. 4 にみられるように、蒸気養生の際の最高温度を高くするにつれて、長期材令への強度増進率が低下することを示している。成形後の養生温度が高いと短期材令の強度が高いが長期材令への強度の伸びが低下するのは、セメントの水和に対する高温の影響でのべたように、水和生成物の緻密な被膜が長期の水和を阻害すること、水和生成物の不均一分布、空孔の増加、低カルシウム型の水和物に進みにくいことなどのためである (p. 133 参照)。蒸気養生の際の最高温度を高くすると脱型時に高強度がえられ、型わくの回転とか工程の短縮に有利であるが、長期のコンクリートの品質とくに圧縮強度、耐久性、ひびわれ発生などに与える影響を考慮すると、密封型わくや加圧型わくの場合のように型わくによってコンクリートが拘束されている場合を除いて、80℃ 以上とくに 90 ～ 100℃ といった高温を利用するのは有利ではないと考えられる。

図 - 2. 4. 4 蒸気養生したコンクリートの材令と圧縮強度との関係

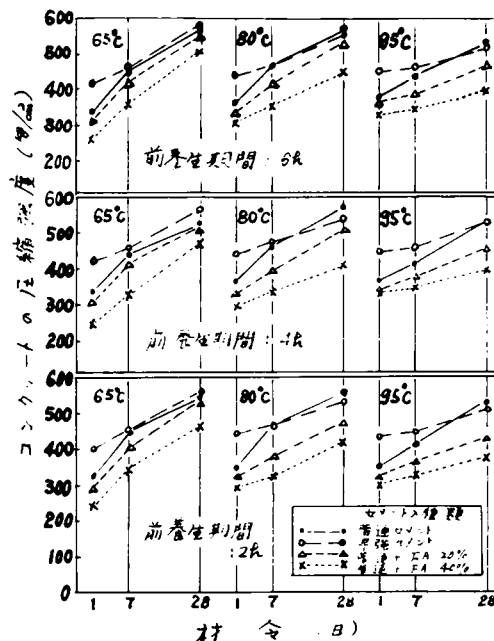
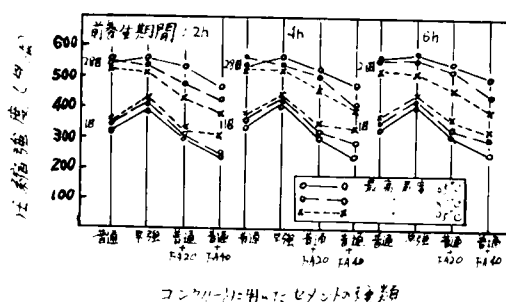


図-2.4.5 最高温度をかえて蒸気養生したコンクリート強度におよぼすセメントの種類の影響



また、セメントの種類と圧縮強度との関係を示した図-2.4.5にみられるように、最高温度の材令28日の圧縮強度におよぼす影響はセメントの種類によつて多少こととなっている。すなわち、早強セメントを用いたコンクリートでは、65℃養生の強度が高い。普通セメントを用いたコンクリートでは80℃、66℃、95℃の順となっており、早強セメントのコンクリートよりやや養生温度を高くしたほうが有利な結果がえられている。これは、普通セメントは表-2.4.5のセメントの化学成分にみられるように $C_3S/C_2S$ 比が早強セメント小さい、水和の促進によって生ずるセメント粒子周囲のゲル状物質や結晶による被膜の生成による長期強度増進の阻害の影響がいくぶん小さいためと考えられる。

A C I Committee 517の報告<sup>181)</sup>にも指摘されているように、フライアッシュを用いたコンクリートは感温性が大であり、最高温度を高くすることによって脱型時の強度はさすが、それだけ長期材令への強度増進率が低下し、しかも混入量が多くなるとその傾向が顕著になるので、添加量は20%以下とし(市販のフライアッシュセメントではA種またはB種)、最高温度も80℃以下におさえるのが適当と思われる。

## 2) 前養生期間の影響について

前養生期間別に各種コンクリートの相対強度を示した図-2.4.3にみられるように、セメントの種類によって前養生期間の影響は多少こととなるが、一般に、前養生期間を長くしたほうが各材令とも強度は大となる傾向がある。前養生期間が長いほど、コンクリートの品質とくに強度にいい影響を与える主な理由としては、前養生中にセメント粒子が吸水し、水和反応が進み、ゲル状の水和生成物をつくること、コンクリート中の自由水が減少し、温度上昇の際の変形が少なくしかもこれに抵抗する強度が高くなることなどが考えられる。

普通セメントのコンクリートでは、前養生期間が4時間と6時間との結果が各温度、各材令とも高い強度を示し、前節の結果とほぼ一致している。しかし、凝結時間のはやい早強セメントでは、他のコンクリートに比べて2～6時間の前養生の差が明瞭でなく、他の場合より前養生を短縮できることを示している。逆にフライアッシュを混入した場合には6時間の結果が最大となっており、多少前養生時間を長くしたほうが有利である。表-2.4.5に示したセメントの凝結時間と比較すると、常温成形の場合には、このセメントの始発から終結時間程度の前養生期間をとるのが適当ではないかと考えられる。

なお、本実験では前養生期間を長くした場合、その時間だけ冷却期間を短縮した。したがって、マチュリティーは65℃養生の場合で前養生を2時間から6時間に長くすると、1050℃・hから950℃・hに下がるが、逆にコンクリート強度は大となっており、Hanson<sup>218)</sup>の指摘しているように、前養生時間を少し長くすることが、結果的には蒸気養生期間を短縮することにな

っている。また、<sup>218)</sup> Hanson は、前養生 1 時間の場合、温度上昇速度のいかににかかわらず供試体の側面にひびわれを発生したと報告しているが、前養生を 2 時間、上昇速度を 2.0 deg/h とした本実験の場合、最高温度のいかににかかわらず各種コンクリートともひびわれ発生は認められなかった。

### 3) 標準養生を行なったコンクリートの強度

各種コンクリートを蒸気養生しないで、20℃霧養生を行なった結果を表-2.4.6に示す。65℃で蒸気養生を行なったコンクリートの1日強度は標準養生では材令4日頃の強度に相当し、この値は各種コンクリートともほぼ同様である。

表-2.4.6 20℃で霧養生した各種コンクリートの圧縮強度

セメントの種類	コンクリートの配合				材令と圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )				蒸気養生 *
	スランブ(cm)	C(kg)	W/C+I(%)	s/a(%)	1日	3日	7日	28日	1日強度(kg/cm <sup>2</sup> )
普通	5±1	450	3.6.4	4.0	112(18) <sup>**</sup>	317(51)	452(73)	620(100)	335(54)
早強	5±1	450	3.9.1	4.0	157(24)	392(60)	518(79)	655(100)	420(64)
普通+FA20%	5±1	360+90	3.3.8	4.0	91(15)	272(45)	411(68)	608(100)	303(50)
普通+FA40%	5±1	270+180	3.2.7	4.0	60(12)	216(40)	347(64)	544(100)	243(45)

注)\*前養生期間4h、最高温度65℃、\*\*( )標準養生28日強度に対する比

結局、蒸気養生を行なったコンクリートの脱型強度は、同じ前養生期間であれば最高温度の高いほど大となるが、長期材令への強度増進率は低下する。したがって、脱型に必要な強度のえられる範囲内で最高温度は低目にするのが望ましいが、セメントの種類によって養生温度の影響は多少こととなり、JIS製品に規定されている65℃をいくぶん上回る80℃までの最高温度の採用は可能であると考えられる。また、常温成形したコンクリートの前養生期間はセメントの始発時間から終結時間程度の値をとるのがよいと思われる。

## § 5. 等温養生期間中の強度発現と冷却方法の影響

### (1) 実験の概要

蒸気養生中のコンクリートの圧縮強度を試験し、等温養生期間中の強度発現におよぼす影響を調べ、また冷却方法が養生効果におよぼす影響についても検討した。<sup>374)</sup>

普通セメント(比重=3.16、28日圧縮強度=420 kg/cm<sup>2</sup>)を用いた。粗骨材は安倍川産で最大寸法25 mmのもの(比重=2.64、吸水量=1.0%)、細骨材は荒川産の粗砂と鬼怒川産の微砂とを混合したもの(比重=2.62、吸水量=1.9%、粗粒率=2.81)を使用した。コンクリートの配合は単位セメント量300 kg、スランブ4 cmを目標とした表-2.4.7に示すものとした。

表-2.4.7 コンクリートの示方配合

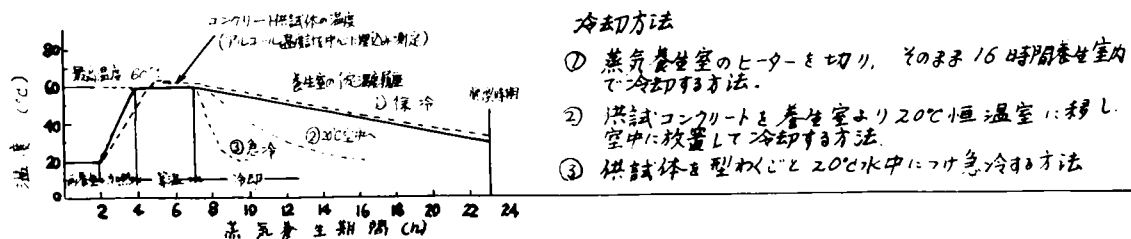
最大寸法	目標スランブ	空気量	W/C	s/a	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )			
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	C	S	G
25	3~5	—	5.1	4.5	153	300	831	1109

表面乾燥飽水状態の粗、細骨材を使用し、コンクリートは容量50ℓの可傾式ドラムミキサを用いて練り混ぜを行った。練り混ぜ後、ただちにφ10×20 cmの円柱形型わくにコンクリートを一層に盛り込み、直径28 mmで振動数8000 v p mの棒形振動機を用いて締固めを行ない、実験用の蒸気養生そうを用いて所定の蒸気養生を行なった。



蒸気養生条件は、図－2.4.6に示したとおりで、最高温度60℃としてサーモスタットで調節して3時間等温養生を行なったのち、3種の方法でクーリングを行なった。

図－2.4.6 供試コンクリートの蒸気養生条件と冷却方法



所定の冷却を行なった供試体は、その圧縮強度を成形後24時間で測定し、冷却期間の養生効果を調べた。なお、蒸気養生中および蒸気養生直後の圧縮強度試験を行なう場合には、前養生期間中にセメントペーストとガラス板を用いて表面仕上げを行なった。なお、蒸気養生期間中の強度発現とくに等温養生期間の影響を調べる場合には、成形後4、5、6、7、8および10時間で養生中のコンクリート供試体を取り出して圧縮強度を試験した。なお、冷却方法のことなる供試体については28日強度も試験した。

## (2) 実験結果と考察

### 1) 等温養生期間の影響について

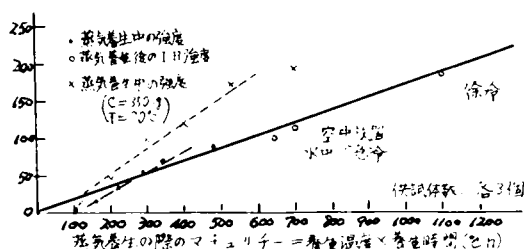
蒸気養生の際の等温養生の経過時間によるコンクリートの圧縮強度の発現状況を表－2.4.8に示す。この結果より、コンクリートの初期硬化が進み、強度発現が顕著になるのは等温養生

表－2.4.8 等温養生の経過時間とコンクリートの圧縮強度

予定等温養生の経過時間(h)	0	1	2	3	4
成形後の経過時間(h)	4	5	6	7	8
コンクリートの圧縮強度 ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )	4.8	15.8	31.8	51.7	67.5

期間であることがわかる。成形後7時間（等温養生3時間）でおおよそ50  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ の強度がえられており、等温養生期間1時間当りの強度増加量は16～20  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ の値となっている。

図－2.4.7 蒸気養生の際の供試コンクリートのマチュリティーと圧縮強度



試験材令 24 時間までの供試コンクリートについてマチュリチーと蒸気養生中および冷却後の圧縮強度との関係を示すと図-2.4.7 のとおりであり、マチュリチーの増加とともに強度も高くなっている。この結果にみられるように、冷却期間中および冷却後のコンクリートもその際のマチュリチーを求めて図示すれば、等温養生期間中の強度増加と直線の勾配はことなるが、ほぼ直線関係で示されている。

なお、養生期間の短縮について検討する目的でこの実験に用いたものとは品質のことなる普通セメントで、単位セメント量 350 kg 使用し、前養生期間 1 時間、温度上昇速度 30 deg/h で最高温度 80℃ で養生した場合のマチュリチーと強度との関係も図-2.4.7 に記入したが、点線のようになり強度の増加率は多少ことなっており、等温養生期間が長くなると増加率は小となる傾向がある。また、この 80℃ 養生の場合 1 時間当りの強度増加は約 25 kg/cm<sup>2</sup> となっており、最高温度が高いほど同じ養生期間であれば脱型強度は高くなることを示している。

## 2) 冷却方法の影響について

冷却方法のことなったコンクリートの圧縮強度を示した表-2.4.9 にみられるように、徐冷終了時の材令 1 日で 182 kg/cm<sup>2</sup> の強度がえられており、20℃ 空中で冷却したものや 20℃ 水中で急冷したものに比べてかなり高い値を示している。温度下降の際に養生室内で徐々に冷却すると

表-2.4.9 冷却方法のことなったコンクリートの圧縮強度

養生方法	冷却方法	各材令の圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			マチュリチー * (°C·h)
		1 日	7 日	28 日	
蒸気養生	養生室内で徐冷	182	283	432	1095
	20℃ 空中で冷却	115	—	390	700
	20℃ 水中で急冷	97	—	406	650
標準養生	—	72	265	455	(480)

注) \* 供試体中心に埋設した温度計の実測温度より計算、冷却期間も含む

保溫養生が継続され、脱型強度を高めるのに効果的であることがわかる。

つぎに、3 種の冷却方法を採用した場合の材令 28 日の圧縮強度は、標準養生を行なったものに比べて劣るが、蒸気養生を行なったものの中では養生室内で徐冷したものがもっとも大で、空中で冷却したものはこれより 10 多程度が低くなっており、水中で急冷したものよりも低い。これは冷却期間中の乾燥の影響ではないかと考えられる。なお、60℃ の養生室より取り出し、いきなり 20℃ の水中に浸漬し、40℃ の温度差をつけて急冷したが、脱型後、供試体側面にひびわれ発生は認められなかった。これは型わくのままだかも湿潤状態で冷却しているためと思われる。

なお、蒸気養生したコンクリートの脱型時の強度は、先に述べた養生温度のほか、使用セメントの種類、単位セメント量、水セメント比、混和材料の有無など配合によってもかなり相違するので同じ養生期間でより高い強度をえることが可能である。

結局、等温養生期間中にコンクリートの硬化が促進され、強度発現が顕著になる。60℃ 養生の場合 1 時間当り 16~20 kg/cm<sup>2</sup> 程度の強度増加が期待できるが、この値は最高温度が高くなるとより大となる。また、蒸気養生効果を高めるためには、より長く養生室内で徐冷を行なうのが有利であり、急冷を行なう場合には湿潤状態で冷却するのがよいといえる。

## § 6. 蒸気養生後の養生条件の影響

### (1) 実験の概要

コンクリート製品では蒸気養生後もできるだけ湿潤養生を続けるよう指摘されているが、これに関する研究結果はほとんどみられていないので、蒸気養生後の養生温度、水中養生期間など後養生

375)  
の際の養生条件の影響について検討を行なった。

#### 1) 使用コンクリートと供試体の作成

セメントは早強セメントおよび普通セメントを使用した。その鉱物組成および主な物理試験結果を表-2.4.10に示す。粗骨材は安倍川産のもの(最大寸法=15mm、比重=2.65、吸

表-2.4.10 使用セメントの鉱物組成と物理的性質

セメント の種類	鉱物組成(%)				物理的性質								
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	比重	ブレーン 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			圧 縮 強 さ (MPa)			
							W/C (%)	始 発 (h-m)	終 結 (h-m)	1 日	3 日	7 日	28日
早 強	65.4	11.5	8.0	8.5	3.13	4200	26.6	1-59	2-59	91	223	320	455
普 通	54.7	21.0	8.7	9.1	3.16	3280	26.5	2-54	3-50	—	137	236	404

水量=1.2%)、細骨材は相模川産のもの(粗粒率=3.11、比重=2.62、吸水量=2.2%)を用いた。コンクリートは製品工場で実際に使用しているボール、パイルなどの配合を参考にして、単位セメント量450kg、スランプは5cmを目標とし、早強セメントを用いたものと普通セメントに減水剤のボゾリスNo.5を加えた表-2.4.11に示す2種の配合を用いた。

表-2.4.11 使用したコンクリートの示方配合

配 合 No.	セメント の種類	最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				単 位 混和剤量(CC)
							W	C	S	G	
I	早 強	15	5±1	—	39.1	40	176	450	697	1057	—
II	普 通	15	5±1	2~2.5	34.7	40	156	450	710	1076	2250*

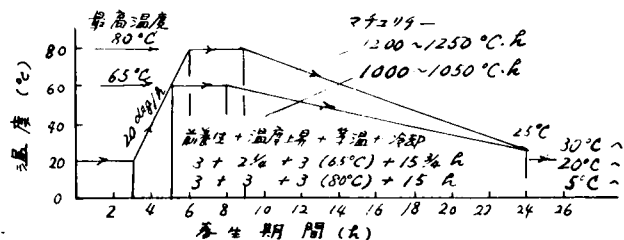
\*ボゾリスNo.5をセメント量に対し0.5%使用

コンクリートの練りまぜは、温度20℃±1deg、相対湿度70~85%の恒温室で容量50ℓの可傾式ミキサを用いて3分間行なったのち、φ10×20cmの内柱形型わくに詰め、球形振動機で締固めを行なった。

#### 2) 蒸気養生方法とその後の養生条件

供試体は成形後、型わくの上面をガラス板でふたをして実験用の蒸気養生そうに入れ、図-2.4.8に示す条件で蒸気養生を行なった。最高温度は65℃と80℃との2種とした。

図-2.4.8 供試コンクリートの蒸気養生条件



所定の蒸気養生を終えた供試体は20℃の恒温室に移し、セメントペーストで表面仕上げを行ない翌日(計令2日)脱型し、表-2.4.12に示す養生条件で後養生を行なった。なお、脱

表－2.4.12 蒸気養生後および普通養生の養生条件と材令

実験シリーズ	使用 コンクリート	蒸気養生 温度 (°C)	蒸気養生後および普通養生の養生条件と材令		
			水中養生期間(日)	養生温度 (°C)	試験時の材令(日)
(I) 水中養生期間の影響	配合Ⅰ、Ⅱ	65、80	0、2、5、12	20	1、4、7、14、28、91
(II) 養生温度の影響	配合Ⅰ	65	5、所定材令まで	5、20、30	1、4、7、14、28、91
(III) 蒸気養生を行わない普通養生	配合Ⅰ、Ⅱ	—	5、所定材令まで	5、20、30	3、7、14、28、91

注) 水中養生後は室中養生

型時の材令1日の強度を測定する供試体は前養生期間中に表面仕上げを行なった。また、水中養生期間の影響を検討するシリーズで、所定期間水中養生を行なった供試体は、その後20℃の室中養生に移した。養生温度の影響を検討する場合には、5℃、20℃および30℃とした。

さらに蒸気養生の結果と比較するため、表－2.4.12に示したように20℃成形を行ない、蒸気養生を行なわないで2日目に脱型後、5℃、20℃および30℃の各温度で普通の水中養生（以下普通養生と呼ぶ）を行なった供試体も作成し、材令7日以後は乾湿の強度におよぼす影響も調べた。所定材令の供試体はJISA1108に準じて圧縮強度試験を行なった。

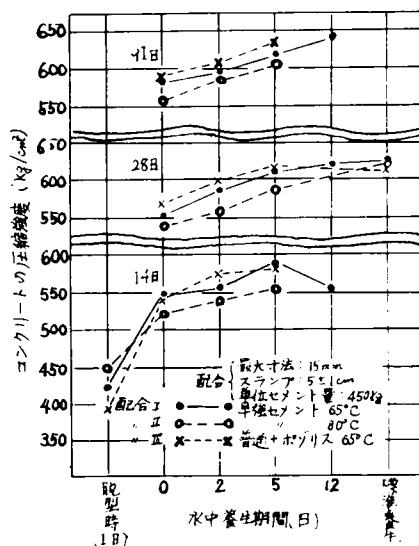
## (2) 実験結果とその考察

### 1) 蒸気養生後の水中養生期間の影響

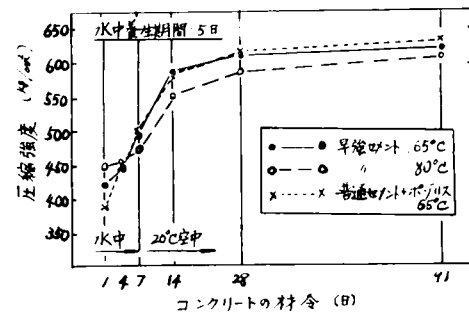
蒸気養生後の20℃の水中養生期間と圧縮強度との関係を示した図－2.4.9にみられるように、セメントの種類や蒸気養生の際の最高温度のいかんにかかわらず、いずれのコンクリートも蒸気養生後の水中養生期間を長くしたほうが各材令とも明らかに強度は大となっている。

つぎに、水中養生期間5日の場合について材令と圧縮強度との関係を示すと図－2.4.10の

図－2.4.9 蒸気養生後の水中養生期間と圧縮強度との関係



図－2.4.10 材令7日より20℃室中養生を行なったコンクリートの圧縮強度



ようになり、蒸気養生温度が高いほど脱型時の1日強度は大であるが、後養生による強度増進率は小さい。また、普通セメントにポズリス $\mathcal{M}5$ を加えたコンクリートは、早強セメントのコンクリートとほぼ等しい強度がでており、富配合には良質の減水剤を用いるのが効果的であることを示している。

### 2) 蒸気養生後の養生温度と乾湿の影響

図-2.4.1.1に示したように蒸気養生後5℃、20℃および30℃の水中養生を続けた場合、材令28日までは養生温度の高いほど強度は大であるが、材令91日では20℃養生がもっとも強く、つづいて30℃、5℃の順となり、一般に高温成形、低温養生は強度が低くなっている。日本セメント技術協会コンクリート委員会の報告<sup>376)</sup>によると、材令28日までの結果では高温で成形し低温で養生したものがもっとも強度が低いと述べている。成形温度や養生温度が低いほど長期材令への強度増進率が高くなることは、本章第2節に述べたが、蒸気養生後低温で養生した場合、材令28日までの強度は低いが、28日から91日への増進率はもっとも顕著である。なお、マッサコンクリートと同じ温度履歴で養生したモルタルやコンクリートの試験結果<sup>375),377)</sup>によると材令1年では低温養生においづく傾向がえられている。

つぎに、材令7日から空中養生に移した場合5℃、20℃および30℃の水中からそれぞれの温度の空中に移した図-2.4.1.1と材令7日まで20℃水中養生後5℃、20℃および30℃の空中養生に移した図-2.4.1.2の結果とにみられるように、材令14日では乾燥のため、水中養生より強度は大であるが、以後その伸びが低下し、91日材令では水中養生の結果より劣り、とくに乾燥度の激しい30℃空中養生の場合には、材令14日より強度低下の傾向を示し91日ではもっとも低い値となっている。養生温度が低く、相対湿度が比較的高い場合

図-2.4.1.1 蒸気養生後の養生温度および乾湿による材令と圧縮強度との関係

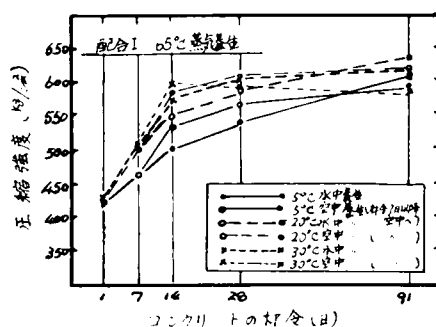
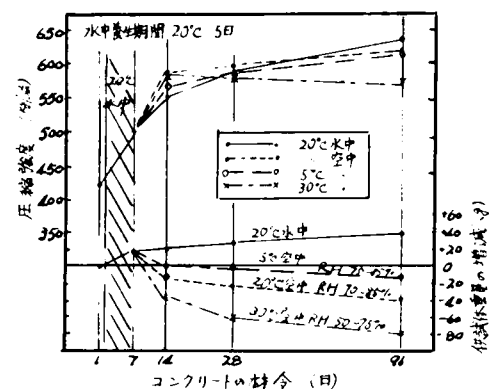


図-2.4.1.2 材令7日まで20℃水中養生後空中養生した場合の圧縮強度



には、コンクリートの乾燥速度が遅いため長期材令にわたってかなりの強度増進を示している。乾湿によるコンクリートの強度変化を調べた別の実験<sup>378)</sup>でも、湿度が高ければ、空中養生してもコンクリートの硬化はかなり進むという結果がえられている。

なお、乾燥状態に移すと一時的に強度の増加する原因としては、乾燥の際にペーストが収縮して密度が大となること、骨材の周囲に引張応力を生じること、コンクリート中の自由水の静水圧の変化などが考えられている。<sup>379),380)</sup> また、堀江<sup>381)</sup>は、乾湿による強度変化の主な原因は表面エネルギーの相違にあるとし、乾燥供試体の破壊は一般にぜい性的でエネルギーの吸収状態が少ないと述べている。

### 3) 普通養生の養生温度と乾湿の影響

表-2.4.1.3のように、5℃、20℃、および30℃の各養生温度の影響を比較すると、材令28日までは養生温度が高いほど強度は大であるが、91日では20℃養生がもっとも強い。材令7日より空中養生に移すと乾燥により、一時的に強度は高くなるが、蒸気養生の場合と同様に、材令が進むにつれて強度増進率が低下している。

蒸気養生したコンクリートは、普通養生に比べて初期材令の強度が高く空中養生による強度

表一 2. 4. 1 3 普通養生したコンクリートの養生温度と各材令の圧縮強度

コンクリートの配合	水中養生 温 度 (℃)	各 材 令 の 圧 縮 強 度 (Kg/cm <sup>2</sup> )								蒸気養生
		3 日	7 日	1 4 日		2 8 日		9 1 日		1 日強度
				水 中	*空 中	水 中	*空 中	水 中	*空 中	(Kg/cm <sup>2</sup> )
配合Ⅰ ( 早強 )	5	3 0 6	4 2 5	5 1 5	5 2 2	5 6 6	5 6 4	6 4 4	6 3 4	4 2 8
	2 0	3 1 9	4 6 7	5 4 3	5 7 2	6 0 4	6 2 6	6 5 9	6 3 0	4 2 2
	3 0	3 4 6	4 7 6	5 5 5	5 7 6	5 9 8	5 8 2	6 8 9	5 5 2	4 2 4
配合Ⅱ ( 普通 )	2 0	3 5 4	4 7 3	5 5 9	5 7 5	6 1 0	6 4 3	7 0 1	6 5 5	3 8 9

\*材令7日以後空中に放置して乾燥養生      コンクリートの成形温度  $20^{\circ}\text{C}$

低下率が多少低いので、とくに水中養生期間の短いコンクリートでは、乾燥に対し蒸気養生が多少有利であると考えられる。

後養生条件の影響を検討した以上の結果、結局、蒸気養生後も水中養生期間を長くしたほうが各材令とも圧縮強度が大となるので、できるだけ水中養生期間を長くすることが望ましい。また、後養生の温度が高いと、材令28日までの強度は大となるが、91日材令では  $20^{\circ}\text{C}$ 、 $30^{\circ}\text{C}$ 、 $50^{\circ}\text{C}$  の順となり、空中養生を行なうと乾燥の影響をうけて強度増進率が低下する。

## § 7. 最適蒸気養生条件について

蒸気養生によってセメントの水和が促進され、所要強度が早くえられるが、蒸気養生条件が適当でないと強度発現の不振、ひびわれ発生、耐久性の低下などコンクリートの品質に対して不利な結果をまねくことになる。したがって、コンクリート製品の蒸気養生を行なう場合にはその製品に最適の蒸気養生条件を採用する必要があるが、これはすでに第3章で検討したように使用材料や配合などのほか製品の所要の品質、工程など種種の要因によってことなるので一定の条件を示すことはきわめて困難といわなければならない。

すでに、第2章の既往の研究でも述べたように、Hanson<sup>218)</sup>は前養生期間、温度上昇速度、最高温度などの種種の組合せについて研究し、最適養生条件は全養生期間を18時間とした場合に、前養生  $5 \pm 2$  時間、温度上昇速度  $2.2 \pm 3^{\circ}\text{deg/h}$ 、最高温度は  $66^{\circ}\text{C}$  であると報告している。また、A C I Committee 517の報告<sup>181)</sup>では、最適の養生条件は製品の種類によってことなるが、一般の構造部材では前養生3時間以上、温度上昇速度  $2.2^{\circ}\text{deg/h}$ 、最高養生温度  $66 \sim 79^{\circ}\text{C}$  で  $17 \sim 18$  時間の蒸気養生を行なうことを推奨している。

ボール、パイル、ヒューム管などの代表的なコンクリート製品を対象とし、1日1サイクルの型わくの回転を考え、使用材料と配合、蒸気養生条件の影響について研究した第3章、第4章の結果より普通ポルトランドセメントを用いたときの最適養生条件を求めると、前養生期間2～4時間、温度上昇速度  $1.5 \sim 2.0^{\circ}\text{deg/h}$ 、最高温度は  $60 \sim 80^{\circ}\text{C}$  で等温養生期間を2～4時間、徐冷期間は少なくとも3時間以上でできるだけ長くとり、脱型時の所要強度によって全養生期間を  $12 \sim 18$  時間とし、蒸気養生後もできるだけ湿潤養生を行なうのがよい。なお、適当な前養生期間はセメントの品質や成形温度によってことなり、セメントの始発時間以降終結時間内に選ぶのがよいが、常温成形の場合、早強ポルトランドセメントで1～2時間、混合セメントでは3～5時間が適当である。また、普通ポルトランドセメントに促進剤あるいは減水促進剤を用いたコンクリートでは早強ポルトランドセメントと同じ前養生期間にしてよい。成形温度が低くなり、 $10^{\circ}\text{C}$  程度になった場合には、前養生を多少長くするか、温度上昇速度を低目にする必要がある。

さらに、蒸気養生の際の最高温度については、現在の J I S 規定を上回る養生温度の採用は可能であるが、セメントの種類によって影響がことなり、普通ポルトランドセメントや混合セ

ントは65～80℃、早強ポルトランドセメントはやや低目の60～70℃が適当と考えられ、長期強度の損失を考えると脱型強度のえられる範囲内で低目にするのがよい。

## § 8. 結 語

蒸気養生を行なう場合の成形温度、前養生期間、最高温度、等温養生期間、後養生などの養生条件がコンクリートの品質とくに圧縮強度におよぼす影響を調べ、使用材料や配合も考慮して最適養生条件について検討した本章の結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) コンクリートの成形温度が低いと前養生期間を多少長くする必要があるが、蒸気養生を行なえば20℃成形の場合とほぼ同じ脱型強度がえられ、蒸気養生後低温で養生しても以後の強度発現は良好である。
- (2) 前養生期間は、コンクリートの諸強度におよぼす影響よりみて2～数時間とするのがよい。A・Eコンクリートでは、普通コンクリートより前養生をやや長目に、最高温度も少し低目とするのがよいが、最適養生条件は大差がない。
- (3) 最高温度を高くすると脱型時の強度は大となるが、長期材令への強度増進率が考るので、80℃以下とするのがよい。養生温度を高くする場合には前養生期間を長くするとよい結果がえられる。
- (3) 最高温度を高くした場合の効果は、早強セメントより普通セメントを用いたコンクリートやフライアッシュを混入したものの方が大であり、フライアッシュの代替率はB種フライアッシュセメントに相当する20%までが適当である。
- (5) 等温養生期間中にコンクリートの硬化が進み、コンクリートの強度は増大し、普通セメントを用いた一般製品用配合で60℃養生の場合、1時間当り1.6～2.0 kg/cm<sup>2</sup>の強度増加を示す。蒸気養生効果をより高めるためには養生室内でできるだけ長く徐冷を行なうのがよい。
- (6) 蒸気養生後は水中養生期間を長くしたほうが、長期材令の強度は大となり、この水中養生温度が高いほど材令28日までの強度は高いが、長期材令では低温養生との差が小となる。
- (7) 後養生の際に水中養生から空中養生に移すと、乾燥により長期材令への強度増進率が低下するがその影響は、蒸気養生しないものより小さい。なお、乾燥状態に移しても、湿度が高い場合にはかなりの強度増進が認められる。
- (8) コンクリートの最適養生条件はセメントの品質、配合、工程、部材の寸法、などによってことなるが、1日1サイクルの工程で、高強度の土木用製品を対象として普通セメントを用いた場合を考えると、

$$\begin{aligned} & \text{前養生} + \text{温度上昇 (上昇速度)} + \text{等温養生 (最高温度)} + \text{冷却期間} \\ & = 2 \sim 4 + 2 \sim 3 (1.5 \sim 2.0 \text{ deg/h}) + 2 \sim 4 (60 \sim 80 \text{ C}) + 6 \sim 10 \text{ h} \end{aligned}$$

が適当と考えられ、所要強度によって全養生期間を12～18時間とする条件が推奨される。

- (9) セメントの種類によって、前養生期間、最高温度などの養生条件は多少ことなり、常温成形の場合、つぎの条件が提案できる。

ポルトランドセメントの種類	前 養 生 期 間	温 度 上 昇 速 度	最 高 温 度
普 通 セ メ ン ト	2～4 h	1.5～2.0 deg/h	65～80℃
早 強 セ メ ン ト	1～2	1.5～2.0	60～70
混 合 セ メ ン ト	3～5	1.5～2.0	70～80

また、低温成形の場合、最高温度を高くする場合などでは前養生期間を多少長くし上限値をとるのがよい。セメントの終結時間を前養生期間にとるとコンクリートの品質に悪影響は少ない。なお、促進剤を用いる場合には前養生も含めて養生期間の短縮が可能である。

## 第5章 蒸気養生を行なったコンクリートの諸性質

### § 1. 緒 言

蒸気養生を行なったコンクリートの諸性質については十分に究明しておかなければならない。とくに、コンクリートの圧縮強度は、構造物の設計や品質判定の基準とされており、蒸気養生がコンクリートの品質におよぼす影響についても、この圧縮強度で検討されている場合が多く、既往の研究で述べたように多くの研究結果が報告されている。しかしながら、蒸気養生を行なったコンクリートの標準養生に対する強度比は、研究者によってかなりことになっており、まだ一定の見解は示されていない。これは、使用材料、配合、養生条件などが、研究者によってことなるためであり、多くの実験結果より考察する必要があると考えられる。また、蒸気養生の際の養生温度が高いほど、あるいは養生期間が長いほど、初期材令の強度は大となり、一般の製品工場ではコンクリートの脱型強度を推定するのにマチュリチーを実用している場合がある。したがって、セメントの品質、配合などの影響について明らかにしておかなければならない。

蒸気養生がコンクリートの曲げ強度、引張強度、付着強度などの圧縮強度以外の強度特性におよぼす影響について検討した結果はきわめて少ない。とくに、鉄筋コンクリート部材が力学的に一体のものとして働くためには、鉄筋とコンクリート両部材間に十分な付着力をもたなければならないが、蒸気養生が付着強度におよぼす影響については十分に検討されていない。さらに、スラブ、はりなどのように曲げや引張応力を受ける部材では、弾性変形や引張変形も問題になる。

工場生産部材を用いてコンクリート構造物をつくる場合、ジョイントのひびわれを防止するには乾燥収縮をできるだけ小さくすることが望ましい。一般に、蒸気養生によって乾燥収縮は低減されるが、セメントの種類、単位セメント量、単位水量、最高養生温度などをかえて検討する必要がある。

耐久性はコンクリートのきわめて重要な性質の一つであり、直接、外気に露出されるコンクリート部材ではとくに大切である。製品に用いるコンクリートは、一般に、富配合で水セメント比が小さいかた練りで、しかも機械的締固めによって成形するので、密実で品質はよいが、蒸気養生を行なった場合コンクリートの凍害抵抗性は、既往の研究で述べたように標準養生を行なったものより多少劣ることが報告されており、人工軽量骨材コンクリートの場合も含めて、今後さらに検討する必要があると思われる。

蒸気養生を行なったコンクリートの諸性質は、第3章、第4章に述べた圧縮強度の結果にみられるように、使用材料、配合のほか採用する蒸気養生条件ともきわめて密接な関係があるが、本章では1日1サイクルを考慮した蒸気養生条件を主として採用し、単位セメント量300～450 Kgの製品用配合を用いて、強度特性、乾燥収縮、耐久性などの問題点について実験、検討を行なった。

### § 2. 圧 縮 強 度

#### (1) ま え が き

コンクリートは圧縮に対して強く、引張りに対して弱い材料であり、圧縮強度はもっとも重要な性質で、圧縮強度の値から他の強度特性やコンクリートの品質をおおよそ推定することができるため、従来より圧縮強度に関して多くの研究が行なわれ、単に強度といえば圧縮強度を意味している。

蒸気養生はコンクリートの硬化を促進し、初期材令の強度を高めるのに効果的であるが、長期材令への強度増進率が低下するため、材令28日では標準養生強度より劣ることが明らかにされている。しかし、その割合は、使用材料、配合、養生条件と関連するので一定の見解は示されて

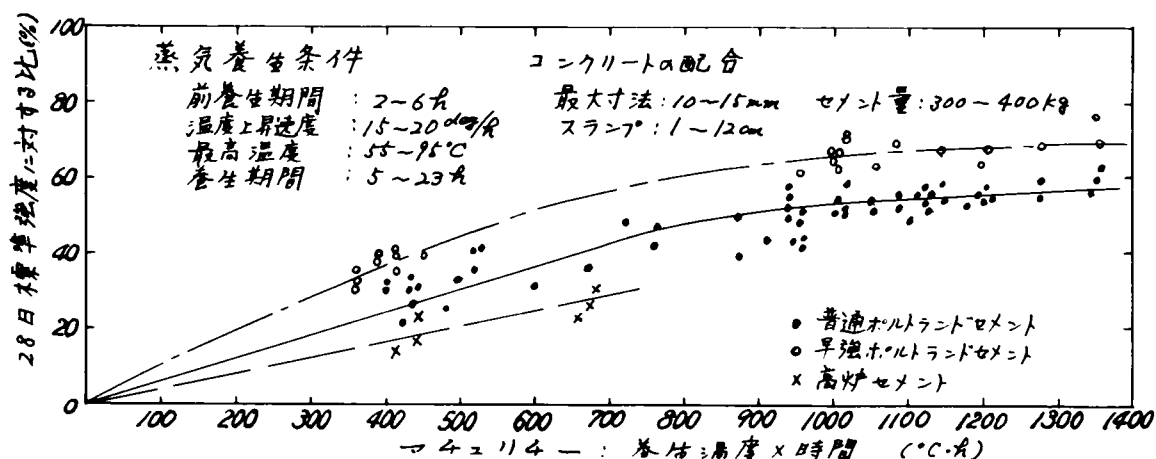


いない。したがって、蒸気養生に関して今までに行なった実験結果（参考文献：179), 190), 297), 298), 299), 303), 326), 329), 330), 359), 374), 375), 382)）を用いて、脱型時（12～24時間）7日および28日の蒸気養生による強度発現について標準養生強度と比較して検討し、また、脱型時強度とマチュリチーとの関係について考察した。

## (2) 脱型時の圧縮強度について

コンクリートの圧縮強度は、セメント、骨材などの使用材料の品質、水セメント比、単位セメント量などの配合や蒸気養生条件によってことなるので、標準養生したコンクリートの材令28日の圧縮強度に対する蒸気養生したコンクリートの脱型時の強度比、すなわち標準強度を100、としたときの相対強度を求め、脱型時の強度試験を行なうまでのマチュリチー（養生温度×養生時間）を $0^{\circ}\text{C}$ を基準として計算し、両者の関係を示すと図-2.5.1のとおりである。この結果より明らかなように、マチュリチーと脱型時の相対強度との関係はセメントの種類によってかなり相違する。また、同じ種類のセメントでもかなりのばらつきがみられるが、セメントの粉末度や化

図-2.5.1 脱型時の圧縮強度とマチュリチーとの関係



学成分、配合、蒸気養生条件などの差異のためと思われる。1000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ までは、マチュリチーの増加とともにほぼ直線的に脱型強度がますが、1000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ になると、その増加率はきわめて小さくなっており、マチュリチーで1000 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 以上になると蒸気養生を続けても養生効果のきわめて少ないことを示している。ACI Committee 517<sup>181)</sup>の報告では、800 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ まではマチュリチーの増加とともに強度は直線的に増加している。

図-2.5.1に示した結果をもとにして、標準養生28日強度の約50%の値をえるのに必要なマチュリチーを求めると、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは800~900 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは550~650 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ が必要になる。1日1サイクルの工程で全養生期間16~18時間、マチュリチー1000~1100 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ の蒸気養生を行なえば、脱型時の材令1日で、普通セメントのコンクリートで50~60%の相対強度、早強セメントの場合には60~70%の相対強度をえることができる。早強セメントを用いると普通セメントに比べて相対強度が10%程度高く、いわゆる蒸気養生効果がよく、脱型時に高強度をえたり、養生期間を短縮するのにかなり有利であることを示している。

## (3) 材令7日および28日の圧縮強度について

初期に高温養生を行なったコンクリートは、すでに第2章、第3章に述べたように、水和反応を促進すると未水和セメント粒子周囲の水和生成物の緻密な被膜の生成、その微構造の不均一分布、空孔の増大、あるいは高温でできたケイ酸カルシウム水和物の安定化などにより、長期材令への

強度増進率が低下する。したがって、図-2.5.2に示したように材令7日になると、圧縮強度がおおよそ $300 \text{ Kg/cm}^2$ 以下のコンクリートでは、蒸気養生を行なったものが標準養生を行なったものよりわずかに高くなっているが、標準養生したコンクリート強度が蒸気養生したものにおいつく傾向があり、 $300 \text{ Kg/cm}^2$ をこえる高強度コンクリートでは、両者は大差なく、逆に標準養生強度が高くなるものもある。

材令28日になると図-2.5.3に示したように1,2の例外を除いて蒸気養生したコンクリートの

図-2.5.2 材令7日における蒸気養生と標準養生との圧縮強度の比較

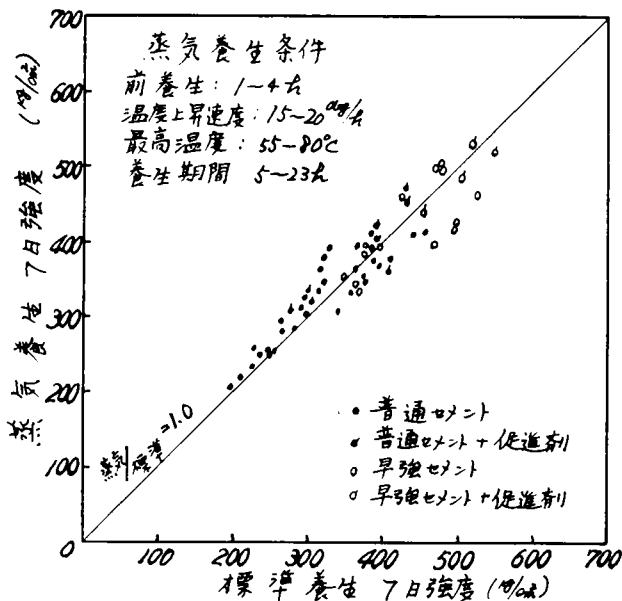
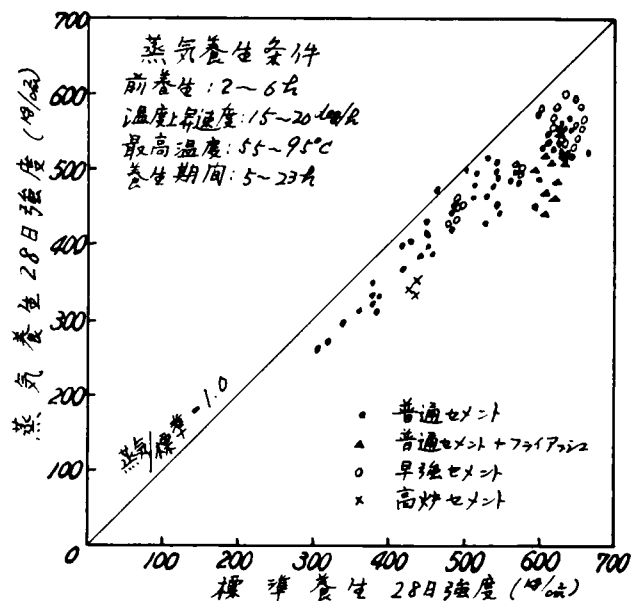


図-2.5.3 材令28日における蒸気養生と標準養生との圧縮強度の比較



圧縮強度が標準養生したものより明らかに小さく、その比を求めると大部分の値が80~95%の範囲であり、全平均は88%となっている。したがって、普通の蒸気養生条件であれば、蒸気養生したコンクリートの材令28日の圧縮強度は、標準養生28日強度よりおおよそ10~15%低下するとみなされる。また、この蒸気養生による強度低下の割合は普通セメント、早強セメントの場合ともほぼ同じ割合を示している。なお、混合セメントでは実験数が少ないが低下率がやや大となる傾向がみられる。

つぎに、実験結果は少ないが化学混和剤を用いた場合の材令28日における蒸気養生強度と標準養生強度との関係を図-2.5.4に示した。この結果にみられるように促進剤(減水促進剤を含む)を用いると蒸気養生による材令28日の強度低下率は小さく、その相対強度を求めると平均97%となっている。なお、AE剤を用いたコンクリートは平均91%で普通コンクリートと大差ない値を示している。なお、使用した促進剤は塩化カルシウムとボゾリスNa 10で、それぞれセメント量に対して1%添加したものである。

#### (4) ま と め

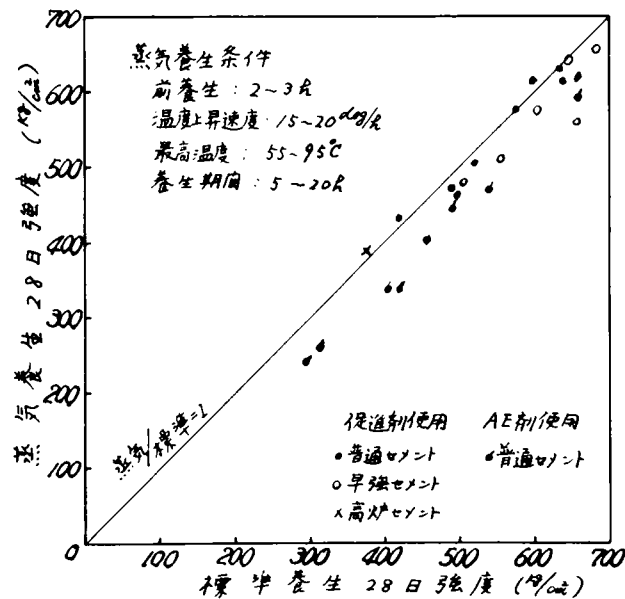
蒸気養生を行なったコンクリートの圧縮強度試験結果を標準養生強度と比較して考察した結果をまとめると、

- 1) 蒸気養生は脱型時の強度を高めるのに効果的で、 $0^\circ\text{C}$ を基準として計算したマチュリティーで $1000^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ までは脱型強度はほぼ直線的に増加するが、この値以上になると増加率は低下する。両者の関係はセメントの種類によって相違する。
- 2) 脱型時に、標準養生28日強度の50%の値をえるには普通セメントのコンクリートで800

～900 °C・h、早強セメントの場合には550～650 °C・h のマチュリティーが必要である。

- 3) 蒸気養生を行なったコンクリートは長期材令への強度増進率が劣るので、材令7日で標準養生強度と大差なくなり、材令28日ではおおよそ10～15%低い値となる。なお、促進剤を用いたコンクリートではこの低下率は小となる。

図-2.5.4 化学混和剤を用いたコンクリートの蒸気養生強度と標準養生強度との比較



### § 3. 曲げ強度と引張強度

#### (1) 実験の概要

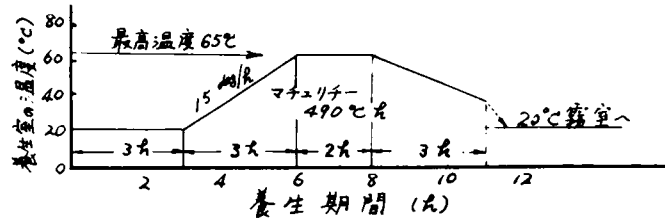
蒸気養生がコンクリートの曲げ強度や引張強度におよぼす影響については、ほとんど研究されていないので、コンクリートの配合をかえた数種のコンクリートを用いて検討した。<sup>326), 382)</sup>

使用材料は、第3章、第3節(2)に述べたものと同様で、普通セメント、安倍川砂利、相模川砂にビンソル、ポゾリスNo.5、塩化カルシウム、リタール、フライアッシュなどの各種混和材料を取りあげた。使用コンクリートは、粗骨材の最大寸法15mm、目標スランプ3cmで表-2.3.17(p.150参照)に示した6種の配合のほか、単位水量をましてスランプ8cmとしたブレンコンクリートP1-8 ( $W/C = 38.9\%$ ,  $s/a = 40\%$ ,  $W = 171\text{ Kg}$ ,  $C = 450\text{ Kg}$ ,  $S = 702\text{ Kg}$ ,  $G = 1064\text{ Kg}$ )とスランプ3cmで単位セメント量を350KgとしたP1-350 ( $W/C = 44.3\%$ ,  $s/a = 43\%$ ,  $W = 155\text{ Kg}$ ,  $S = 702\text{ Kg}$ ,  $G = 1082\text{ Kg}$ )を加えた計8種の配合とした。

容量50ℓの可傾式ミキサを用いてコンクリートを練り混ぜたのち、曲げ強度試験用供試体の作成には  $10 \times 10 \times 40\text{ cm}$ のはり型わく、引張強度試験用には  $\phi 10 \times 20\text{ cm}$ の円柱形型わくにそれぞれコンクリートを詰め、棒形振動機によって締固め成形を行なった。成形後、ただちに蒸気養生そうに入れ図-2.5.5に示す条件で蒸気養生を行なった。なお、ポリエチレンシートと輪ゴムを用いてコンクリートの露出面をシールして養生を行なった。

曲げ強度と引張強度試験用供試体は成形後24時間で脱型し、以後は20°Cの霧室で養生し、材令2日および28日で試験を行なった。なお、比較用の圧縮強度は  $\phi 10 \times 20\text{ cm}$ の供試体を用いたが、蒸気養生後、翌日キャッピングを行ない、48時間目に脱型し、以後霧室で養生し、

図-2.5.5 コンクリート供試体の蒸気養生条件



材令28日で試験した。なお、蒸気養生を行わない標準養生供試体も作成し、材令2日および28日で強度試験を行なった。

## (2) 実験結果の考察

### 1) 曲げ強度について

蒸気養生したコンクリートの曲げ強度を標準養生の結果と比較して図-2.5.6に示す。この結果にみられるようにコンクリートの種類によって、曲げ強度の値はことなるが、材令2日および28日の蒸気養生による強度発現の傾向はほぼ同様であり、材令28日になるとコンクリートの種類による曲げ強度の差が小となる傾向があり、また、標準養生との差も小となっている。すなわち、標準養生28日の曲げ強度に対する蒸気養生したコンクリートの相対曲げ強度を求めると、材令2日で平均78%、材令28日では平均95%となっている。同じ養生条件で $\phi 10 \times 20$  cm 円柱 供試体で求めた圧縮強度の場合の平均値は、それぞれ59%および86%となっており、曲げ強度は圧縮強度に比べて蒸気養生による強度低下率が小さいことがわかる。

なお、曲げ試験を終了した供試体のはり折片(6個)で圧縮強度を求めた結果も図-2.5.6に示したが、曲げ強度と多少ことなれた傾向がみられる。すなわちブレン、AE、フライアッシュ、などの各コンクリートは圧縮強度が比較的低いのに曲げ強度は大であり、逆に塩化カルシウムやポゾリスNa5を用いたものは高い圧縮強度を示すにもかかわらず曲げ強度はそれほど高くない。このことは、 $\phi 10 \times 20$  cm 円柱 供試体で求めた圧縮強度で、材令2日および28日の曲げ圧縮比を示した表-2.5.1の結果にもうかがわれる。材令28日の曲げ圧縮比はポ

図-2.5.6 蒸気養生および標準養生を行なった各種コンクリートの曲げ強度

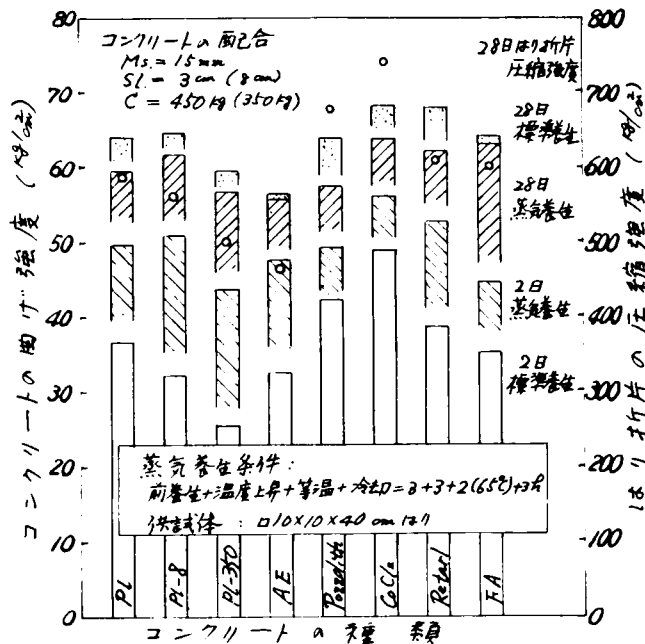


表-2.5.1 各種コンクリートの曲げ圧縮比

コンクリートの種類	材令2日		材令28日	
	標準養生	蒸気養生	標準養生	蒸気養生
P1	12.3	11.4	9.3	10.0
P1-8	14.0	13.2	9.6	11.5
P1-350	14.0	14.5	10.1	11.4
AE	12.9	13.4	10.3	12.2
Pozzolith	11.0	9.6	9.1	8.5
CaCl <sub>2</sub>	11.0	9.9	9.7	8.6
Retarl	13.9	11.1	9.6	10.3
FA	14.1	11.4	9.6	10.4

注) 曲げ強度 ( $\sigma_b$ ):  $100 \times 100 \times 40$  mm (27)

圧縮強度 ( $\sigma_c$ ):  $\phi 10 \times 20$  cm 円柱形

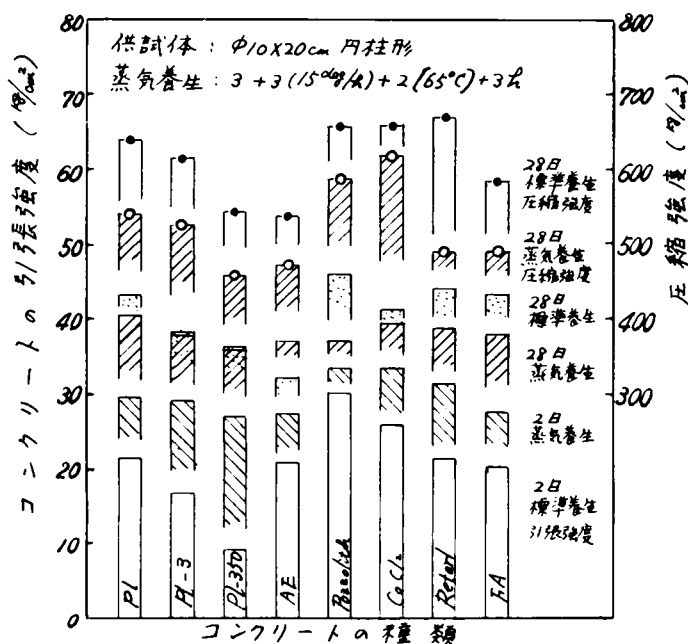
曲げ圧縮比 =  $(\sigma_b / \sigma_c) \times 100$

ゾリスと塩化カルシウムを用いたものを除いて考えると、標準養生より蒸気養生のほうが大となる傾向を示している。また、材令 2 日より 28 日になると曲げ圧縮比は低くなるが、この割合は標準養生のほうが顕著である。

## 2) 引張強度について

蒸気養生および標準養生を行なった各種コンクリートの材令 2 日と 28 日における引張強度ならびに材令 28 日の圧縮強度試験結果を図 - 2.5.7 に示す、コンクリートの種類によって強

図 - 2.5.7 蒸気養生および標準養生したコンクリートの引張強度と圧縮強度



度の値はことなるが、蒸気養生によって材令 2 日で  $26 \sim 34 \text{ Kg/cm}^2$ 、材令 28 日で  $35 \sim 41 \text{ Kg/cm}^2$  の引張強度がえられている。蒸気養生を行なった場合、標準養生の結果に比べて、また、圧縮強度に比べてコンクリートの種類による引張強度の差が小となっている。

各種コンクリートの標準養生 28 日の引張強度に対する、蒸気養生を行なったコンクリートの相対引張強度を求めると、材令 2 日で平均 74%、材令 28 日では平均 93% であり、曲げ強度の結果に近い値となっており、圧縮強度に比べて、蒸気養生による強度減少率が小さい。

結局、以上の結果をまとめると、曲げ強度や引張強度の蒸気養生による強度発現は、圧縮強度に比べて良好で、材令 28 日では、標準養生の値より数パーセント低くなり、この蒸気養生による強度低下率は圧縮強度のおおよそ半分である。また、圧縮強度に比べてコンクリートの品質による強度差が、曲げ強度、引張強度では小となる傾向がある。

## § 4. 付着強度

蒸気養生が鉄筋とコンクリートとの付着強度におよぼす影響について 2 つの実験シリーズにわけて検討を行なった。

### (1) 蒸気養生が付着強度におよぼす影響<sup>383)</sup>

#### 1) 実験の概要

普通セメント (比重 = 3.15, プレーン比表面積 =  $3380 \text{ cm}^2/\text{g}$ , 28 日圧縮強さ = 414

Kg/cm<sup>2</sup> )を用い、粗骨材は安倍川産で最大寸法 10 mm ( 比重 = 2.64 )、細骨材は相模川産で粗粒率が 3.15 のもの ( 比重 = 2.60 )を使用した。混和剤としては、ビンソル、ポゾリス No. 5、塩化カルシウムなどを用いた。鉄筋は直径が 5.7 mm の鉄線で、その試験成績を表 - 2.5.2 に示す。実験に使用したコンクリートの配合は、小型供試体を用い突き棒で成形するので、スラン

表 - 2.5.2 使用鉄筋の試験成績

直径 ( mm )	降伏点 ( Kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ ( Kg/mm <sup>2</sup> )	伸び ( % )
5.71	54.2	59.2	4.7

プを 11 ~ 12 cm とした表 - 2.5.3 に示すものとし、プレーンコンクリートのほか、混和剤を加えたもの、単位セメント量を 320 Kg にしたものも用いた。

表 - 2.5.3 コンクリートの示方配合

コンクリートの種類	最大寸法 (mm)	スラブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 ( Kg/m <sup>3</sup> )				単位 混和剤量
						W	C	S	G	
プレーン	10	10~12	—	46.5	40	200	430	668	1019	—
A E	10	10~12	4~4.5	41.4	37	178	430	616	1064	1080cc
ポゾリス	10	10~12	—	41.6	37	179	430	640	1104	1075g
塩化カルシウム	10	10~12	—	46.5	40	200	430	668	1019	4300g
貧配合	10	10~12	—	62.2	44	199	320	770	1006	—

型わくは  $\phi 7.5 \times 15$  cm の小型のものを用い、図 - 2.5.8 に示すように、鉄筋を型わくの中央に配置した。20 °C の恒温室で、表面乾燥飽水状態の骨材を用いてコンクリートを練り混ぜ、成形には径 6 mm の突き棒を用い、2 層詰めで各層の突き数は 15 回とした。成形後、3 時間の前養生をとったのち、型わくのまま蒸気養生そうに入れ、つぎの条件で蒸気養生を行なった。括弧内は使用したコンクリートの配合を示す。

- ① 15 deg/h の上昇速度で加熱し、最高温度 65 °C まで 3 時間蒸気養生 ( プレーン, A E, ポゾリス, 塩化カルシウム, 貧配合 )
- ② さらに 65 °C 養生を 2 時間続け養生 ( プレーン )
- ③ 25 deg/h の上昇速度で最高温度 85 °C まで養生 ( プレーン )

以上の蒸気養生条件による養生そうの温度測定結果を図 - 2.5.9 に示す。なお、型わくの上面には湿布をかけて養生を行なった。

所定の蒸気養生を終了した供試体は 20 °C の恒温室に移し、翌日表面仕上を行ない、成形後 2 日目に脱型し、以後材令 7 日および 28 日まで 20 °C の霧室で養生した。また、蒸気養生後の養生方法の付着強度におよぼす影響を調べるため、材令 2 日以後 20 °C の水中で養生した場合、7 日まで噴霧養生後 20 °C の空中 ( 相対湿度 80 ~ 90 % ) に移した場合についても調べた。なお、比較のため標準養生供試体も作成した。

材令 2 日、7 日および 28 日の供試体について 10 t 万能試験機を用て引抜き方法による付着強度試験を行ない、最大引抜き荷重時の付着強度を求めた。なお、付着強度試験を終えた供試体は、コンクリートが割れることがないので、鉄筋を保持したまま、横倒しにし割裂方法によって引張強度試験を行ない、付着強度の結果と比較した。各コンクリートの付着強度の変動

係数は1～11%の範囲であり、大部分の値が3～7%内にあるが、強度のばらつきは引張強度より大であった。

図 - 2. 5. 8 付着強度試験用供試体

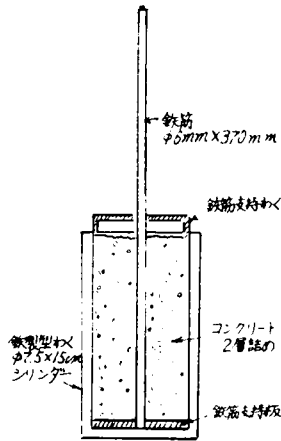
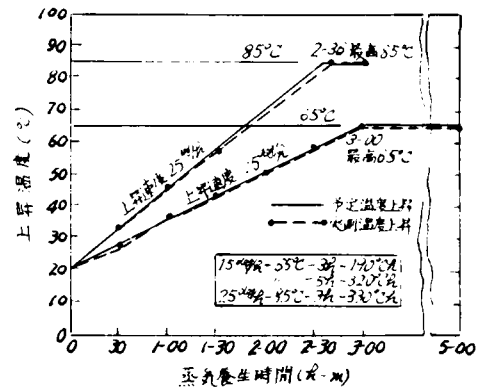


図 - 2. 5. 9 蒸気養生そのの予定温度履歴と実測温度

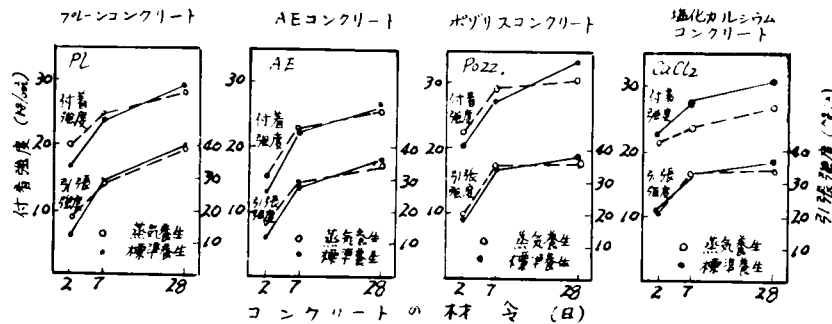


## 2) 実験結果の考察

### i) 各種混和剤を用いたコンクリートの付着強度

各種コンクリートを蒸気養生し、付着強度および引張強度を求めた結果を、標準養生による値と比較して図 - 2. 5. 10 に示す。プレーンコンクリート、A E コンクリートおよびポゾ

図 - 2. 5. 10 各種コンクリートの付着強度と引張強度



リスNa 5を用いたコンクリートは、材令7日までは蒸気養生したものの強度が標準養生の値より高いが、材令28日になると逆に蒸気養生のほうが3～6%低くなっている。一方、塩化カルシウムを用いたコンクリートの付着強度は蒸気養生したものが各材令とも標準養生より劣り、促進養生の効果がみられていないが、この点はさらに検討する必要がある。

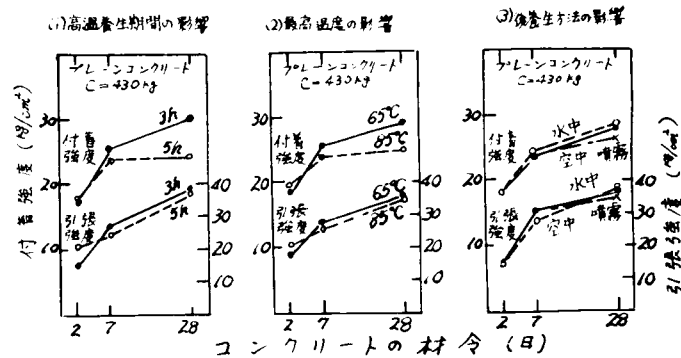
なお、付着強度試験を終えた供試体で求めた引張強度は、4種コンクリートともほぼ同様の傾向で、材令28日では標準養生に比べて蒸気養生の強度がわずかに低くなっている。なお、ポゾリスNa 5と塩化カルシウムを用いたものは、材令2日と28日の引張強度は高いが材令7日より28日への強度の伸びが小さい。

### ii) 蒸気養生条件が付着強度におよぼす影響

単位セメント量430Kgのプレーンコンクリートを用い、蒸気養生期間、最高温度、蒸気養生後の養生条件などをかえて付着強度および引張強度を求めた結果を示した図 - 2. 5. 11

にみられるように、養生時間を長くしたり、最高温度を高くとったりすると材令 2 日の付着強度は大となるが、材令 7 日および 28 日では、養生時間の短い場合あるいは最高温度の低いものより付着強度が劣り、材令 7 日より 28 日への伸びが悪くなっている。付着強度に

図 - 2.5.1.1 各種養生条件がブレンコンクリートの付着強度および引張強度におよぼす影響



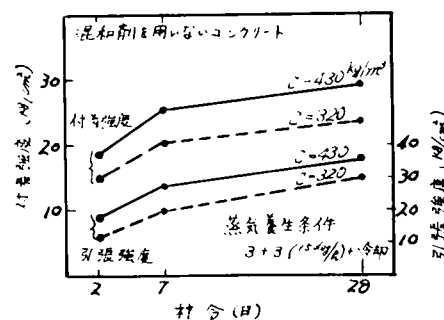
もっとも影響するのはコンクリート中のセメントペーストであり、熱伝導率のよい鉄筋に接した付着面のペーストはその水和がごく初期に促進され、セメント粒子周囲にゲル状物質や水和結晶を析出する種の被膜をつくり、これが長期の水和を阻害する原因となり長期の強度の伸びを悪くするが、この現象が鉄筋との接着力の向上に悪影響を与えていると考えられ、本実験に用いた供試体は、鉄筋が露出されているのでとくに温度の影響に敏感であったと思われる。鉄筋がコンクリート中に埋設されている場合には、この影響はいくぶん緩和される<sup>384), 385)</sup>ものと考えられる。なお、付着強度の改善には異形鉄筋の使用がきわめて効果的であり、Kolner<sup>250)</sup>らは異形鉄筋を用いると蒸気養生を行なってもよい結果がえられると述べている。また、引張強度については、養生時間や最高温度の影響が付着強度に比べて小さく、7日より28日への強度の伸びも良好である。

蒸気養生後の養生方法の影響については、蒸気養生後水中養生を行なったものが付着強度はもっとも大きく、ついで噴霧養生、空中養生の順となる。空中養生では、供試体が乾燥するために水和の進行が阻害されること、ペーストの粘性が低下することなどのために付着強度の伸びがわるくなるものと思われる。

#### 冊) 単位セメント量の付着強度への影響

図 - 2.5.1.2 にみられるように、単位セメント量を増したコンクリートのほうが明らかに付着強度は大きく、付着強度は鉄筋を包むセメントペースト量と密接な関係があることを示

図 - 2.5.1.2 単位セメント量のことなコンクリートの付着強度





している。また、材令による強度発現の傾向もほぼ同様である。なお、引張強度に対するセメント量の影響も、付着強度の場合と差ない結果となっている。

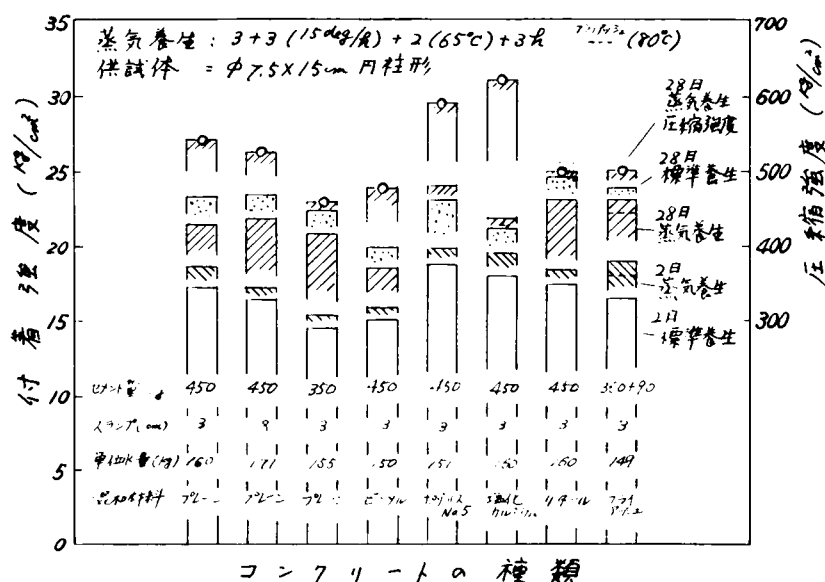
(2) コンクリートの品質が付着強度におよぼす影響<sup>382)</sup>

コンクリートの品質や蒸気養生が付着強度におよぼす影響についてさらに検討するため、配合の種類を多くし、とくに蒸気養生期間の長い場合について実験を行なった。

すなわち、本章第3節に用いた8種のコンクリート配合 (P1, P1-8, P1-350, AE, Pozzo-lith, CaCl<sub>2</sub>, Retarl, FA) を用い、図-2.5.5の蒸気養生条件 3+3 (15 deg/h) + 2 (65 °C) + 3 h のほか、フライアッシュコンクリートについては 3+3 (20 deg/h) + 2 (80 °C) + 3 h の条件についても試験した。なお、鉄筋は前述と同じ径 5.7 mm のもの (引張強さ 59.1 Kg/mm<sup>2</sup>) を用い、型わく寸法は  $\phi 7.5 \times 15$  cm の円柱形で、前述と同様の方法で供試体を作成した。

各種コンクリートについて材令 2 日および 28 日で付着強度を求めた結果を図-2.5.13に示す。蒸気養生を行なったコンクリートの材令 2 日の付着強度は標準養生の値よりわずかに大きく、

図-2.5.13 蒸気養生および標準養生を行なった各種コンクリートの付着強度の比較



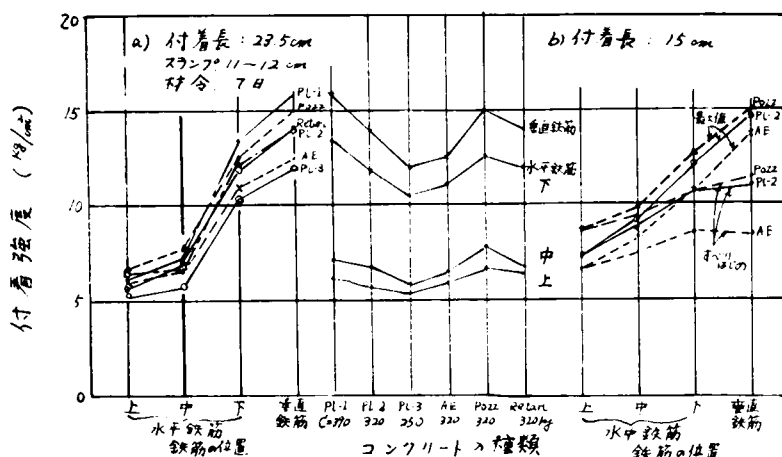
蒸気養生による初期材令の強度増進の効果は、圧縮強度や他の強度特性の場合ほど顕著でない。しかし、材令 28 日の標準養生の付着強度を 100 として蒸気養生の 28 日の相対付着強度を求めると 92~103%、平均 96% であり、圧縮強度の 86% と比較すると相対付着強度はかなり大となっている。

前述の(1)の実験では、蒸気養生の際のマチュリチーが 190~320 °C・h ときわめて低い場合について報告したが、マチュリチーをおおよそ 500 °C・h とした本実験でもほぼ同様の傾向がえられている。すなわち、単位セメント量の多いもののほうが付着強度は大であり、AE コンクリートでは付着面に気ほうの存在するため、同じセメント量のプレーンコンクリートより弱い。また、良質の減水剤を用いると付着に対して効果的であり、塩化カルシウムを用いたものは、圧縮強度のきわめて高い割合には付着強度が低く、2 日より 28 日への強度の伸びは最低で、付着に対して有効な混和剤とはいえないように思われる。なお、フライアッシュを用いたコンクリートでは 65 °C と 80 °C 養生を行なったが、前実験と同様に養生温度を高くすると付着に対して不利な結果がえられている。しかし、蒸気養生が付着強度におよぼす影響は、圧縮強度に比べて

顕著ではなく、材令28日ではコンクリートの品質による付着強度の差が小となる傾向がみられている。

なお、径19mmの普通丸鋼を使用し、蒸気養生しない場合について、コンクリートの品質が付着特性におよぼす影響について検討した結果によると、図-2.5.14に示したように、付着強度は単位セメント量と密接な関係があり、単位セメント量の多いコンクリートほど付着強度は高いが、同一セメント量のコンクリートでは、減水剤を用いたものが最大で、AEコンクリートはもっと

図-2.5.14 コンクリートの種類や鉄筋位置と付着強度



も低く、前述の結果と大差ない傾向がえられている。

結局、蒸気養生が付着強度におよぼす影響は他の強度特性の場合ほど顕著でなく、材令2日では標準養生の値よりわずかに大きく、材令28日では逆に若干低くなる。付着強度を高めるには、富配合コンクリートを用い、できるだけ養生条件をゆるやかに、蒸気養生後も湿潤養生を続けるのがよく、コンクリート品質の影響は圧縮強度より小となっている。なお、とくに付着をよくするためには異形鉄筋の使用が推奨される。

## § 5. 引張変形

### (1) 実験の概要

近年、コンクリート製品が曲げや引張変形を受ける部材にも使用されており、蒸気養生したコンクリートの引張変形についても検討しておく必要があり、曲げ引張ひずみについて標準養生したコンクリートの値と比較検討した。

セメントは普通セメントと早強セメントとの2種類を使用し、粗骨材は安倍川産で最大寸法15mmのもの、細骨材は荒川産で粗粒率が2.81のものを用い、コンクリートは表-2.5.4に示す4種の配合とした。

表-2.5.4 使用したコンクリートの配合

セメント の 種 類	配 合 No.	最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (Kg/m³)			
						W	C	S	G
普・通	N-350	15	5±0.5	45.7	42	160	350	786	1097
	N-450	15	5±0.5	36.9	40	168	450	707	1072
早 強	H-350	15	5±0.5	47.4	42	166	350	776	1089
	H-450	15	5±0.5	39.1	40	170	450	697	1057

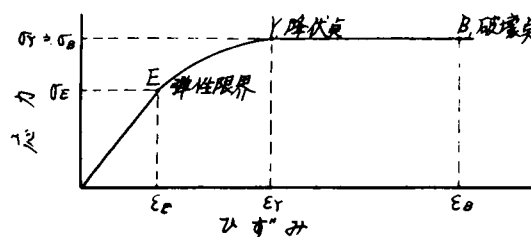
供試体成形用の型わくはすべて  $110 \times 10 \times 40 \text{ cm}$  のはりを用い、一層に詰め、振動数 7500 vpm の棒形振動機を用いて締固めを行なった。成形温度はすべて  $20^\circ\text{C}$  である。蒸気養生条件は、最高温度を  $65^\circ\text{C}$  と  $80^\circ\text{C}$  との 2 種とし、前養生期間を 2 時間とったのち、 $65^\circ\text{C}$  の場合は  $15 \text{ deg/h}$ 、 $80^\circ\text{C}$  では  $20 \text{ deg/h}$  の上昇速度で加熱期間を 3 時間、等温養生期間を 2 時間とったのち、以後材令 1 日まで養生室内で冷却を行なった。脱型後は所定材令まで  $20^\circ\text{C}$  の水中で養生した。なお、蒸気養生を行なわない  $20^\circ\text{C}$  標準養生供試体も作成した。

所定材令の 1 日（脱型時）、7 日および 28 日でたわみ振動による動弾性係数を測定し、その後 4 時間室温で供試体を乾燥させ、その引張側底面のスパン中央にゲージ長  $60 \text{ mm}$  の抵抗線ひずみゲージを貼付し、ひずみ指示計を用いて引張ひずみを測定した。なお、載荷スパンは  $30 \text{ cm}$  で 3 等分点載荷とし、その速度は  $0.2 \text{ Kg/cm}^2/\text{sec}$  とした。高応力になりクリープ現象が認められると、一定荷重下でクリープがほぼとまるまでひずみを測定した。なお、曲げ供試体の折片を用いて圧縮強度も求めた。すべての試験値は供試体 3 個の平均値であり、ひずみゲージ外で破断したものは除外した。

## (2) 実験結果の考察

コンクリートはりの曲げ引張試験を行なった場合の応力ひずみ曲線は、コンクリートの配合、材令、養生方法またはゲージ標点と破断面の位置との関係などによって種種の形状を示すが、概略は図-2.5.15 のとおりである。この図で弾性限界  $E$  は、標準養生で材令 1 日の弱いコンクリートの場合、 $\sigma_E / \sigma_B = 0.6$  前後で、 $\epsilon_E$  は  $0.6 \sim 0.7 \times 10^{-4}$  である。材令の進んだコンクリー

図-2.5.15 引張を受けるコンクリートの応力ひずみ曲線



トまたは蒸気養生を行なった強度の高いコンクリートでは、 $\sigma_E / \sigma_B = 0.8$  で  $\epsilon_E$  は  $1.1 \sim 1.7 \times 10^{-4}$  と大きくなる。降伏点  $Y$  から破壊点  $B$  に至るまでの挙動は、強度の弱いコンクリートでは急速にクリープして破断するから、この実験に用いたひずみ計では追隨することは困難であったが、強度が強くなるとクリープは緩慢で、 $H-450$  のコンクリートで  $65^\circ\text{C}$  養生、28 日材令の場合、 $\epsilon_Y = 2.0 \times 10^{-4}$  から  $\epsilon_B = 6.1 \times 10^{-4}$  まで 4 分程度かかって破断した。すべての供試体における破断ひずみ  $\epsilon_B$  の範囲は  $3.0 \sim 8.0 \times 10^{-4}$  であり、ばらつきがかなり大である。また、コンクリートの伸び能力の最大値は、破断局部の降伏点ひずみに等しいことが波木<sup>388)</sup>によって報告されている。なお、杉木<sup>389)</sup>はコンクリートくいの打込み中に  $1.07 \sim 2.79 \times 10^{-4}$  の動的引張ひずみを生じると報告している。

図-2.5.16 に示した曲げ強度と曲げ引張ひずみの関係にみられるように曲げ強度の増加とともに引張ひずみも増加する。 $\sigma / \sigma_B = 0.5$  以下の低応力のひずみは曲げ強度によって大きな差はないが、 $\sigma / \sigma_B = 0.9$  以上の高応力になると強度の大きいコンクリートほど引張ひずみが大きくなる傾向を示している。これは、粗骨材とモルタルとのかみ合せ抵抗が高強度コンクリートほど大きくなり、そのため塑性ひずみが増加したものと思われる。なお、蒸気養生したもの、標準養生のものも曲げ強度と曲げ引張ひずみとの関係に大差はない。

図-2.5.17 は、材令1日と28日における、養生条件と配合の相違による曲げ強度と降伏点ひずみを示したもので、材令1日の曲げ強度は、各養生条件の場合とも  $N-350$ 、 $N-450$ 、

図-2.5.16 曲げ強度とひずみとの関係

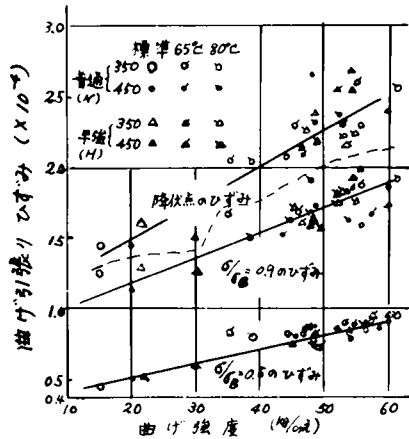
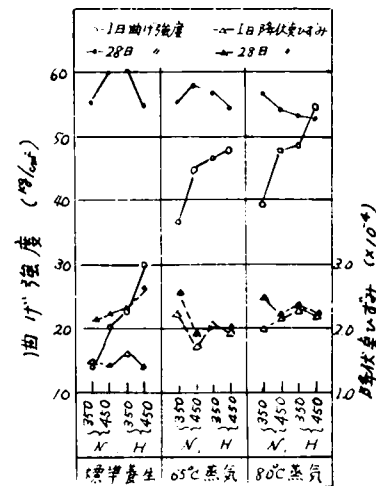


図-2.5.17 養生条件のことなるコンクリートの曲げ強度と降伏点ひずみ



$H-350$ 、 $H-450$ の順に増大する。また、同一配合の場合、 $65^{\circ}\text{C}$  蒸気養生することにより、材令2日の場合、標準養生に比べ曲げ強度で  $18\sim 27\text{Kg/cm}^2$ 、折片圧縮強度は  $180\sim 270\text{Kg/cm}^2$  大幅に増大する。 $80^{\circ}\text{C}$  養生を行なったコンクリートはさらに曲げ強度で  $3\sim 5\text{Kg/cm}^2$ 、圧縮強度で  $30\sim 50\text{Kg/cm}^2$  大となっている。しかし、材令28日になると図-2.5.17にみられるように、セメントの種類、使用量、養生条件などによる強度差は小さく一定の傾向はえられていない。

同一養生条件で同一材令の場合、降伏点ひずみの配合による明らかな差はみられない。材令1日の降伏点ひずみは蒸気養生によって  $0.3\sim 0.8\times 10^{-4}$  程度増大するが、材令28日ではむしろ標準養生のほうが蒸気養生の値よりわずかに大となっている。蒸気養生を行なったコンクリートでは、材令1日以降の水中養生による曲げ引張ひずみの増加がほとんど認められていない。

つぎに、曲げ強度とはり折片の圧縮強度との関係を図-2.5.18に、曲げ強度と動弾性係数との関係を図-2.5.19に、 $\sigma/\sigma_B = 0.5$  で求めた動弾性係数と静弾性係数との関係を図-2.5.20に示す。これらの関係をみると蒸気養生および標準養生を行なったコンクリートとも同じ線上に図示され、養生方法のいかににかかわらず両者の関係はほぼ同じであると考えられる。

波木らは、<sup>390)</sup>コンクリートの引張変形について広範囲の実験と理論的検討を行ない、コンクリートが引張応力を受けて破断するとき、破断局部に高い応力集中を起こし、この局部は他の部分と

図-2.5.18 曲げ強度と圧縮強度との関係

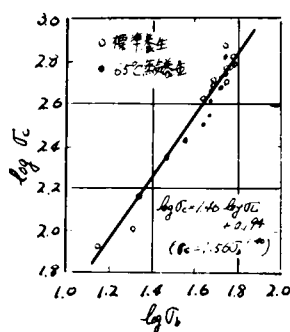


図-2.5.19 曲げ強度と動弾性係数との関係

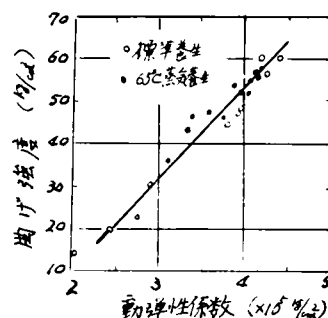
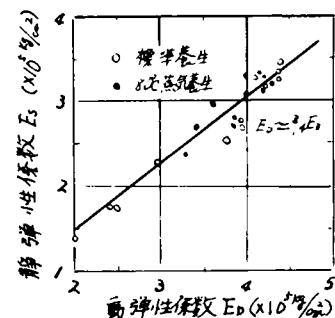


図-2.5.20 静弾性係数と動弾性係数との関係



著しくことなつた挙動を示すと述べている。すなわち、ひびわれの発生した弱点のみに応力が集中し、その局部ひずみが増大することになる。この様相を調べるため、引張底面にゲージ長 20 mm (①～⑤) を貼付し測定を行なつた。応力水準、 $\sigma/\sigma_B = 0.82$ までは各ゲージのひずみとも均一に増加しているが、それより高応力になるとゲージ④のひずみが大きく増加し、③のゲージのひずみは逆にわずかに減少している。この状況を図-2.5.21に示す。

弾性限界以下の応力水準では、ひずみは供試体に均一に分散するためゲージ長さに関係なくひずみの測定値は同じであるが、応力集中局部のひずみ量はゲージ長さによって図-2.5.22のようにことなつた値として測定される。これは、引張底面に幅 1 mm、深さ 10 mm の切欠きを入れ、その上にゲージ長のことなる 4 種のゲージを貼付して測定した値である。ゲージ長 10 mm 以下ではひずみの測定値に差はほとんど認められない。

図-2.5.21 応力集中とひずみ分布図

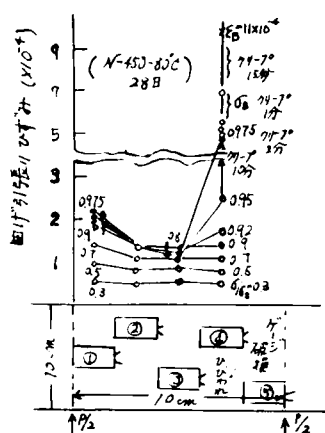
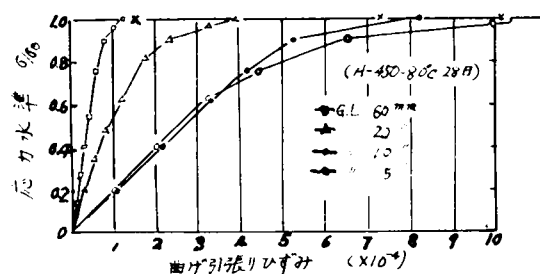


図-2.5.22 応力集中局部のゲージ長と測定ひずみとの関係



曲げ引張りの応力集中局部の挙動は単純引張りの挙動とことなり、複雑であるが、集中局部の長さ ( $\ell$ ) を、図-2.5.22の結果より 10 mm と仮定すると、ゲージ (Li) 60 mm による降伏点ひずみの測定値 ( $\epsilon_Y$ ) から応力集中局部内の伸びひずみ ( $\epsilon$ ) が、波木らの報告による次式を用いて推定できる。

$$\epsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell} = \begin{cases} \frac{Li}{\ell} (\epsilon_Y - \bar{\epsilon}) + \bar{\epsilon}, & Li > \ell \\ \epsilon_Y, & Li < \ell \end{cases} \quad \dots (2.5.1)$$

ただし  $\bar{\epsilon}$  : ゲージで読みとった伸びひずみの実測値

$\sigma/\sigma_B > 0.9$  では、図-2.5.22に示すとおり応力集中局部のひずみは大きな変化がないので、 $\bar{\epsilon}$  は  $\sigma/\sigma_B = 0.9$  のゲージ長 60 mm による測定値とした。ゲージ長 60 mm のゲージで実測した弾性限界ひずみ ( $\epsilon_E$ ) と降伏ひずみ ( $\epsilon_Y$ ) および (2.5.1) 式から計算した応力集中局部内のひずみを示すと表-2.5.5のとおりである。この結果によると、60 mm のゲージによる降伏点の実測ひずみは  $1.38 \sim 2.70 \times 10^{-4}$  であるが、これに対応する応力集中局部のひずみを推定すると  $2.23 \sim 7.68 \times 10^{-4}$  である。

結局、蒸気養生を行なうことにより、材令 1 日の降伏点ひずみは標準養生を行なつたコンクリートの値より  $0.3 \sim 0.8 \times 10^{-4}$  程度増大するが、材令 28 日ではむしろ標準養生のひずみが蒸気養生の値より大となる。高強度コンクリートのひずみが低強度のものより大きくなるが、これは塑性ひずみの増加によるものであり、蒸気養生したコンクリートでは、材令 1 日以降のひずみの

表 - 2. 5. 5 ゲージ長60mmによる実測ひずみと計算によるひずみ ( $\times 10^{-4}$ )

	N-350-標準			N-350-65℃			N-350-80℃			N-450-標準			N-450-65℃			N-450-80℃		
材 令	1日	7日	28日	1日	7日	28日	1日	7日	28日	1日	7日	28日	1日	7日	28日	1日	7日	28日
弾性限界 $\epsilon_E$	055	153	158	143	149	146	140	156	161	072	156	144	140	142	128	134	128	132
降伏点 $\epsilon_Y$	147	207	218	255	227	262	203	187	250	142	235	225	172	211	192	215	225	220
局 部 $\epsilon$	222	487	538	515	508	627	458	312	450	287	670	435	277	341	347	340	505	550

	H-350-標準			H-350-65℃			H-350-80℃			H-450-標準			H-450-65℃			H-450-80℃		
材 令	1日	7日	28日	1日	7日	28日	1日	7日	28日	1日	7日	28日	1日	7日	28日	1日	7日	28日
弾性限界 $\epsilon_E$	068	148	158	149	155	-	168	152	156	105	132	145	155	112	136	157	136	140
降伏点 $\epsilon_Y$	165	268	226	210	225	-	232	200	236	138	255	270	192	276	203	215	217	215
局 部 $\epsilon$	330	768	490	445	415	-	552	440	636	223	530	670	352	731	464	430	522	465

増加はきわめて少ない。なお、ゲージ長によってひずみの測定値はことなり、60mmのゲージで測定した応力集中局部の降伏点ひずみは $1.4 \sim 2.7 \times 10^{-4}$ となり、この値に対応する応力集中局部のひずみを推定すると $2.2 \sim 7.7 \times 10^{-4}$ となっている。

## § 6. 乾燥収縮

### (1) 実験の概要

コンクリートの乾燥収縮におよぼす蒸気養生の影響について、セメントの種類、単位セメント量、最高温度などをかえて検討した。<sup>392)</sup>

セメントは普通セメント(比重=3.16, 28日圧縮強さ=414 Kg/cm<sup>2</sup>)と早強セメント(比重=3.15, 28日圧縮強さ=469 Kg/cm<sup>2</sup>)とを用い、粗骨材は安倍川産で最大寸法25mmの川砂利、細骨材は荒川産のあら目の砂(5~0.6mm)と鬼怒川産の細砂(0.6mm以下)とを、3:2の割合で混合して粗粒率を2.78としたものを用いた。使用したコンクリートの配合は、表-2.5.6に示す、目標スランプ3cmで単位セメント量をかえたものである。なお、乾燥収縮測定開始時の材令7日の圧縮強度試験の結果も示した。

表 - 2. 5. 6 使用したコンクリートの配合とその品質

セメントの種類	配合No.	最大寸法(mm)	目標スランプ(cm)	W/C(%)	s/a(%)	単位水量W(Kg)	単位セメント量C(Kg)	材令7日の圧縮強度(Kg/cm <sup>2</sup> ) <sup>*</sup>		
								標準養生	60℃蒸気	80℃蒸気
普通	N-300	25	3±1	48.6	43	146	300	299	307	284
	N-350	25	3±1	42.3	42	148	350	374	347	340
	N-400	25	3±1	37.0	41	148	400	405	378	365
早強	H-300	25	3±1	49.3	43	148	300	363	333	333
	H-350	25	3±1	43.4	42	152	350	462	392	407
	H-400	25	3±1	39.5	41	158	400	495	415	425

\*  $\phi 10 \times 20$  cm 円柱供試体で求めた値

20℃の恒温室で棒形振動機( $\phi 28$ mm, 7500vpm)を用いて $10 \times 10 \times 40$ cmはり型わくにコンクリートを成形したのち、蒸気養生そうに入れ、つぎの2種の蒸気養生条件で促進養生を行なった。

- ① 前養生+上昇+等温+冷却期間=2+2(20deg/h)+3(60℃)+3h (450℃・h)
- ② 前養生+上昇+等温+冷却期間=2+3(20deg/h)+2(80℃)+3h (530℃・h)

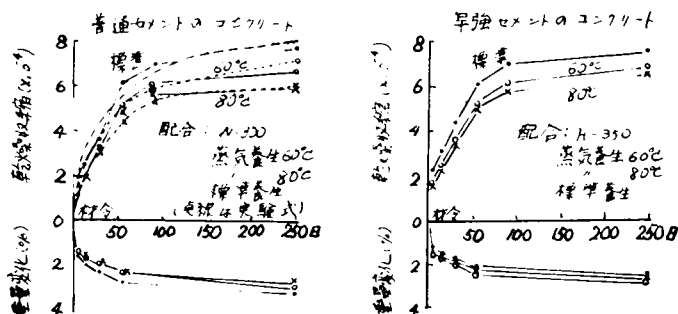
蒸気養生後、ふたたび 20 °C の恒温室（相対湿度 80 ～ 90 %）に移し、成形してから 24 時間後に脱型し、材令 7 日まで 20 °C の水中で養生した。また、比較のため蒸気養生を行なわないで材令 7 日まで標準養生した乾燥収縮試験用の供試体も作成した。蒸気養生、標準養生供試体とも、材令 7 日で水中より取り出し、相対湿度 50 ～ 55 % の乾燥恒温室に移し、基長 254 mm のホイットモアひずみ計を用いて長さを測定し、同時に供試体重量も求めた。なお、乾燥材令 7 日、14 日、28 日、56 日、91 日および 245 日において長さ変化を測定し、乾燥収縮ひずみ（以下乾燥収縮という）を計算した。

## (2) 実験結果の考察

### 1) 蒸気養生条件の影響について

最高温度を 60 °C および 80 °C として蒸気養生したコンクリートの乾燥収縮を標準養生の結果とともに図 - 2.5.23 に示す。

図 - 2.5.23 蒸気養生条件のことなつたコンクリートの乾燥収縮および重量変化測定結果の一例



コンクリートの乾燥収縮は、蒸気養生を行なうことによって、標準養生したものより小となり、その割合は蒸気養生の際の最高温度が高いほど著しい。Higginson<sup>235)</sup>, Nepper-Christensen<sup>252)</sup>らの報告でも、蒸気養生温度が高いほどあるいは蒸気養生期間の長いほど乾燥収縮は低減されると述べており、ACI Committee 517<sup>181)</sup>の報告では、蒸気養生によって乾燥収縮は 30 % 前後、標準養生より小さくなるとしている。本実験の材令 250 日までの結果では、配合や養生温度によってことなるが、蒸気養生によっておおよそ 10 ～ 30 % 減少しており、既往の研究結果よりやや小さいが、マチュリチーが 450 ～ 530 °C・h と比較的小さいこと、蒸気養生後の養生条件、乾燥条件、乾燥材令などの影響もあると思われる。なお、供試体の重量変化については養生条件による差が小となっている。

普通セメントを用いた単位セメント量 300 Kg のコンクリートの各養生条件によるコンクリートの各養生条件による乾燥収縮曲線を求めると、表 - 2.5.7 のようになり、終極ひずみで蒸気養生 60 °C の場合 16 %、80 °C 養生では 27 %、標準養生より減少している。なお、蒸気養生によって乾燥収縮が低減するのは、初期の高温養生によってセメントの水和が促進さ

表 - 2.5.7 養生条件によるコンクリートの乾燥収縮曲線と終極ひずみの一例

養生条件	乾燥収縮曲線	終極ひずみ	乾燥収縮比
標準養生	$St = t / (3.17 + 0.11t)$	$8.93 \times 10^{-4}$	100
60 °C 蒸気養生	$St = t / (3.76 + 0.13t)$	$7.52 \times 10^{-4}$	84
80 °C 蒸気養生	$St = t / (3.40 + 0.15t)$	$6.49 \times 10^{-4}$	73

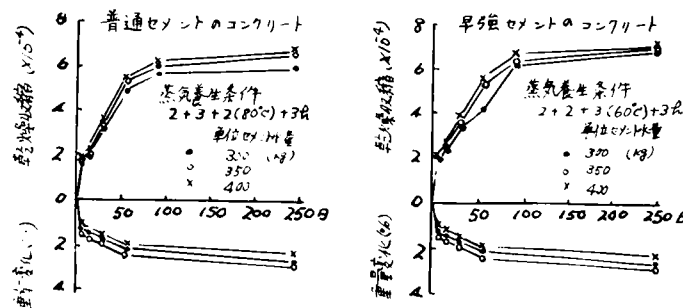
※ 普通セメントのコンクリート，単位セメント量 300 Kg の場合

れ、セメントゲル中の吸収水の一部が化学的結合水となり、コンクリート中の吸収水あるいは自由水の量が標準養生に比べて少なくなるためと考えられる。

## 2) 単位セメント量の影響

コンクリート中の単位セメント量が乾燥収縮におよぼす影響については、普通セメントのコンクリートを  $80^{\circ}\text{C}$  蒸気養生した場合と早強セメントのコンクリートを  $60^{\circ}\text{C}$  蒸気養生した結果を示した図-2.5.24にみられるように、単位セメント量が増加すると乾燥収縮が大となっており、セメント  $100\text{ Kg}$  の増量により  $5\sim 10\%$  収縮が増加している。なお、重量減少率は単位セメント量  $400\text{ Kg}$  の富配合コンクリートがもっとも少なくなっている。<sup>393)</sup> Lyse は、標準養生したコンクリートについて研究し、コンクリート中のセメントペースト量が乾燥収縮やクリープにもっとも影響するので、水セメント比が大きくなっても、単位セメント量を低減

図-2.5.24 単位セメント量がことなつたコンクリートの乾燥収縮および重量変化

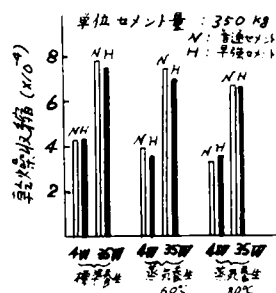


したほうが、乾燥収縮は小さくなると報告しているが、本実験の結果でも単位セメント量の少ないコンクリートは水セメント比は大となるが乾燥収縮は小となっている。<sup>394)</sup> なお、細井は、 $W/C = 40\%$  のセメントペースト、 $W/C = 65\%$  で  $1:2$  配合比のモルタル、 $W/C = 52\sim 58\%$  で  $1:2.75:3.67$  配合のコンクリートなどの乾燥収縮を粉末度のことなるセメントを用いて比較検討し、ブレン比表面積が  $3000\sim 4000\text{ cm}^2/\text{g}$  の普通セメントの場合、乾燥材令56日でセメントペーストが  $3.92\sim 5.06\times 10^{-4}$ 、モルタルでは  $1.42\sim 1.82\times 10^{-4}$ 、コンクリートでは  $6.36\sim 6.64\times 10^{-4}$  であり、セメントペーストがきわめて大きな収縮を示したと述べている。

## 3) セメントの種類の影響

セメントの種類と乾燥収縮との関係を示した図-2.5.25にみられるように、普通セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮が早強セメントを用いたものより大となる傾向があり、これ

図-2.5.25 普通セメントと早強セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮の比較





は材令が長期になるほど顕著である。第3章、第2節、(3)で、普通セメントと早強セメントとのコンクリートの乾燥収縮を比較した場合と比べて、配合、試験条件などのことなるために収縮量の絶対値は多少ことなるが両セメントの差はほぼ同様であり、早強セメントのコンクリートが普通セメントを用いたものより数パーセント小となっている。これは、すでに指摘したように早強セメントは  $C_3S/C_2S$  比が普通セメントより高く、 $C_3S$  の乾燥収縮が  $C_2S$  の値より小さいためと考えられ、Reinsdorf<sup>182)</sup> はおよそ  $1/2$  の値を示している。

#### 4) 供試コンクリートの乾燥量と収縮との関係

一般にコンクリートの乾燥量が大きければ、それだけコンクリート中の自由水、セメントゲル中の吸収水が脱出するので、乾燥収縮ひずみは大きくなる。

供試コンクリートの乾燥による重量変化すなわち乾燥量  $(1 - U_t)$  と乾燥収縮比  $(S_t/S)$ <sup>395)</sup> との関係は材令35週までの測定結果より求めると、図-2.5.26のとおりである。なお、重量減少比  $(U_t)$  は次式で与えられる。

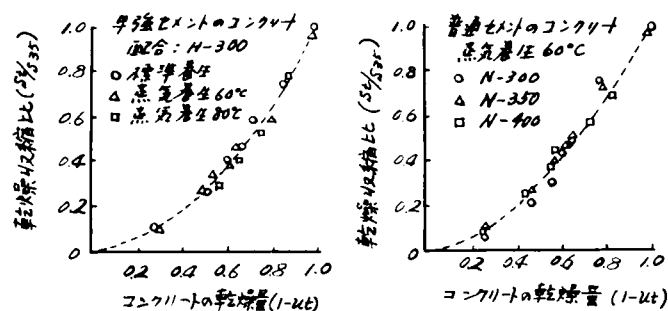
$$U_t = (G_t - G) / (G_0 - G) \dots\dots\dots (2.5.3)$$

ここに  $\left\{ \begin{array}{l} G_0 : \text{最初の供試コンクリートの重量} \\ G_t : \text{材令 } t \text{ における供試コンクリートの重量} \\ G : \text{材令 } 35 \text{ 週における供試コンクリートの重量} \end{array} \right.$

なお、 $S$  は材令35週における乾燥収縮ひずみである。図-2.5.26にみられるように、コンクリートの配合や養生条件の相違にかかわらず、コンクリートの乾燥量と収縮との関係は、つぎの式で与えられることがわかる。

$$S/S_t = (1 - U_t)^2 \dots\dots\dots (2.5.2)$$

図-2.5.26 コンクリートの乾燥量と収縮比との関係



結局、蒸気養生が乾燥収縮におよぼす影響を検討した結果をまとめると、コンクリートの乾燥収縮は蒸気養生によって10～30%低減され、その割合は最高温度の高いほど、マチュリチーの大きいほど大である。また、セメント量をますほど収縮は大となり、早強セメントより普通セメントのコンクリートのほうが乾燥収縮がいくぶん大きい。なお、コンクリートの乾燥収縮は、乾燥による供試体の重量変化ときわめて密接な関係がある。

## § 7. 耐 久 性

### (1) 実験の概要

蒸気養生を行なったコンクリートの耐久性とくに凍結融解に対する抵抗性は、標準養生のものに比べて多少劣るといわれているので、川砂利および人工軽量骨材を用いたプレーンコンクリートおよびAEコンクリートについて検討を行なった。<sup>396)</sup>

普通セメント (比重 = 3.16, プレーン比表面積 =  $3300 \text{ cm}^2/\text{g}$ , 28日圧縮強さ =  $41.5 \text{ kg/cm}^2$ )

を用い、骨材は最大寸法 20 mm の安部川砂利と粗粒率 2.77 の相模川砂および人工軽量骨材は非造粒型の膨張頁岩を使用した。なお、人工軽量粗骨材の最大寸法は 20 mm、表乾比重は 1.47、吸水量は 8.5%、細骨材は表乾比重は 1.86、吸水量は 15.6%、粗粒率は 2.72 のものである。この実験に用いたコンクリートの配合は、製品用配合の中では、スランプのもっとも大きい U 字フリュームに使用されるもので、単位セメント量 350 Kg、スランプ 10～12 cm で、プレーンコンクリートのほか耐久性の向上を目的として目標空気量を 5.0～5.5% の範囲とした AE コンクリートも用いた。コンクリートの配合を表 2.5.8 に示す。

表 2.5.8 実験に用いたコンクリートの配合

配合 No.	使用骨材	最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (Kg)	単位セメント量 (Kg)	単位 AE 剤量 (cc)	28 日圧縮強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	川砂利	20	10～12	—	48.9	45	171	350	—	478
2	川砂	20	10～12	5.0～5.5	45.7	43	160	350	140	392
3	人工軽量	20	10～12	—	52.8	42	185	350	—	422
4	骨材	20	10～12	5.0～5.5	48.6	39	170	350	88	383

＊ ビンソルレジン 20% 溶液

供試体は 110×10×40 cm のはり型わくに棒形振動機を用いて成形してから、蒸気養生そうに入れ、前養生 + 温度上昇 + 等温 + 冷却期間 = 2 + 3 (15 deg/h) + 2 (65 °C) + 2 h の養生条件で蒸気養生を行なったのち、20 °C 恒温室に移し、翌日脱型した。供試コンクリートは、材令 28 日まで 20 °C の水中養生を行なったのち、凍結融解試験機 (木村理化工業 KK 製) を用いて ASTM C 290-63 T に準じ、<sup>397)</sup> -18 °C ~ +4 °C の凍結融解を 150 サイクルまで行ない、動弾性係数を測定した。なお、同時に蒸気養生後 6 日間水中養生し、材令 7 日になった供試体につて、その重量を測定し、105 °C の乾燥器に 1 週間入れて絶乾状態にして供試コンクリートの重量をふたたび測定し、両者の差より吸水量を算出し、凍結融解試験の結果と比較した。

## (2) 実験結果の考察

川砂利、川砂あるいは人工軽骨材を用いた 4 種配合のコンクリートを蒸気養生および標準養生し、150 サイクルまでの凍結融解試験を行なった結果を表 2.5.9 に示す。

表 2.5.9 各種コンクリートの凍結融解試験結果

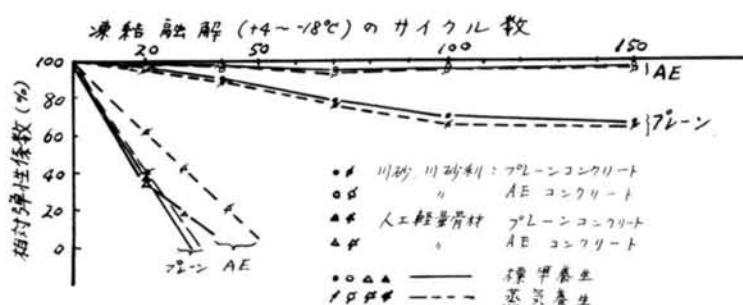
配合 No.	養生条件	試験前の 単位重量 (Kg/m <sup>3</sup> )	各サイクルの相対弾性係数 (%)							吸水量 (%)
			0	20	30	40	70	100	150	
No. 1 川砂利 プレーン	標準	2.450	100	98.0	—	90.1	79.5	69.5	66.2	—
	蒸気	2.418	100	97.1	—	89.2	66.3	66.3	65.3	6.3
No. 2 川砂利 AE	標準	2.349	100	98.8	—	96.9	97.4	97.4	96.2	—
	蒸気	2.322	100	98.3	—	97.8	96.8	96.8	95.6	6.0
No. 3 人工軽量 骨材 プレーン	標準	1.703	100	39.2	—	—	—	—	—	—
	蒸気	1.661	100	42.0	—	—	—	—	—	15.1
No. 4 人工軽量 骨材 AE	標準	1.662	100	38.2	19.0	—	—	—	—	—
	蒸気	1.612	100	63.1	44.8	22.0 <sup>*)</sup>	—	—	—	14.2

＊ 42 サイクルの値

この結果にみられるように、コンクリートの配合が同じであれば、蒸気養生を行なったコンクリートの凍害抵抗性と標準養生を行なったものとはほぼ同じ値を示している。

蒸気養生を行なった場合、Reindorf<sup>182)</sup>、Fedorov<sup>223)</sup>などの研究によるとコンクリートの凍害抵抗性は低下すると述べているが、Mironov<sup>197)</sup>は、蒸気養生後の湿潤養生期間が同じであれば差はないと報告しており、Higginson<sup>235)</sup>の報告では蒸気養生後の湿潤養生期間を長くした場合には、むしろよい結果をえている。本実験では、蒸気養生後4週間湿潤養生を行なっているので図-2.5.27でも明らかなように、川砂利、川砂コンクリートでは、蒸気養生、標準養生の結果ともほぼ同じであり、人工軽量骨材コンクリートでは蒸気養生したコンクリートのほうが相対弾性係数はやや大きくなっている。

図-2.5.27 蒸気養生および標準養生を行なったコンクリートの凍結融解に対する抵抗性



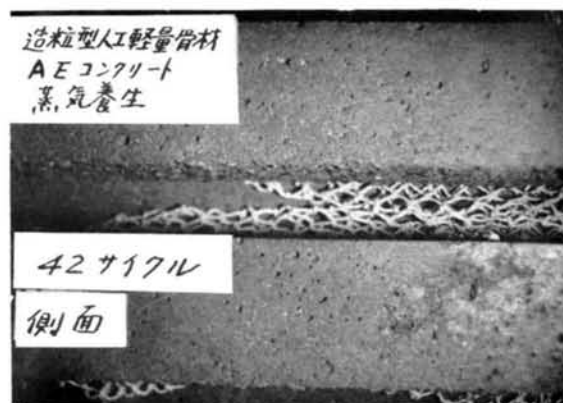
川砂利、川砂コンクリートに比べて軽量コンクリートの凍結融解に対する抵抗性は相当に劣り、AEコンクリートにしても川砂利コンクリートの場合ほど凍害抵抗性の改善に顕著な効果はみられない。西岡は、人工軽量骨材コンクリートの凍害抵抗を改善するには細骨材には川砂を用い、AEコンクリートにするのがよいと述べている。なお、軽量AEコンクリートを蒸気養生および標準養生し42サイクルの凍結融解試験を行なった結果を示すと、写真-2.5.1(1)~(4)のとおりであり、打込み面にかなり顕著なスケールがみられる。

なお、コンクリートの凍害抵抗性は温度、湿度の変化や水の凍結などによる応力の作用に対するコンクリートの抵抗性によって決まるが、これはコンクリート中の空けき機構とも密接な関係があるとされており、空けき量を示す一つの目安としてコンクリートの吸水量、透水性などを考えるとこれらの値からコンクリートの耐久性を判定することも可能であると考えられる。<sup>120), 254), 399)</sup> 蒸気養生したコンクリートで求めたコンクリートの吸水量と凍結融解に対する抵抗性を比較すると、吸水量の多い軽量コンクリートは明らかに凍害抵抗性が劣っている。しかし、川砂利、川砂コン

写真-2.5.1 凍結融解試験を行なった供試コンクリートの例

(1) 蒸気養生を行なったコンクリート，打込み面

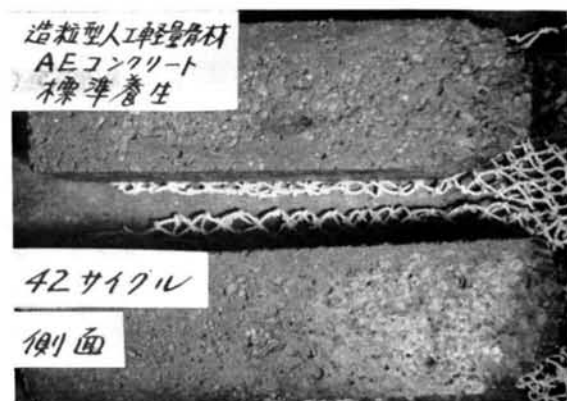
(2) 蒸気養生を行なったコンクリート，側面



(3) 標準養生を行なったコンクリート 打込み面



(4) 標準養生を行なったコンクリート, 側面



リートにみられるようにAEコンクリートとプレーンコンクリートでは吸水量の差は凍結融解試験結果ほど顕著でなく、他の要因も考慮する必要があると考えられる。西岡<sup>40)</sup>らは、人工軽量骨材の吸水量が、耐久性に大きな影響を与えると述べており、吸水量のことなる人工軽量骨材を用いたコンクリートについてさらに検討する必要があると考える。

結局、蒸気養生したコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、一般的な蒸気養生条件が採用され、蒸気養生後も十分な湿潤養生を行なえば、普通コンクリートとほぼ同程度であるといえよう。

## § 8. その他の性質について

蒸気養生がコンクリートの弾性係数、その他の性質におよぼす影響について考察した。

### (1) 弾性係数について

普通セメントおよび早強セメントを用いた最大寸法15mm、スランブ3~4cmのコンクリートを $\phi 15 \times 30$ cm円柱形型わくに詰め、前養生+温度上昇+等温養生+冷却期間=2+3(15deg/h)+2(65℃)+16hの蒸気養生を行ない、動弾性係数を測定した結果を標準養生の結果とともに表-2.5.10に示す。

表-2.5.10 使用したコンクリートの配合と動弾性係数

コンクリートの配合					動弾性係数 ( $\times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ )				
セメント	W/C (%)	s/a (%)	C(Kg)	W(Kg)	蒸気養生			標準養生	
					1日	7日	*28日空中	1日	7日
普通セメント	45.7	42	350	160	31.8	34.2	33.2	21.7	36.0
	36.9	40	450	168	34.0	37.8	35.8	24.6	38.1
早強セメント	47.4	42	350	166	32.2	35.2	34.2	23.5	36.6
	39.1	40	450	176	34.9	38.2	36.0	27.0	39.3

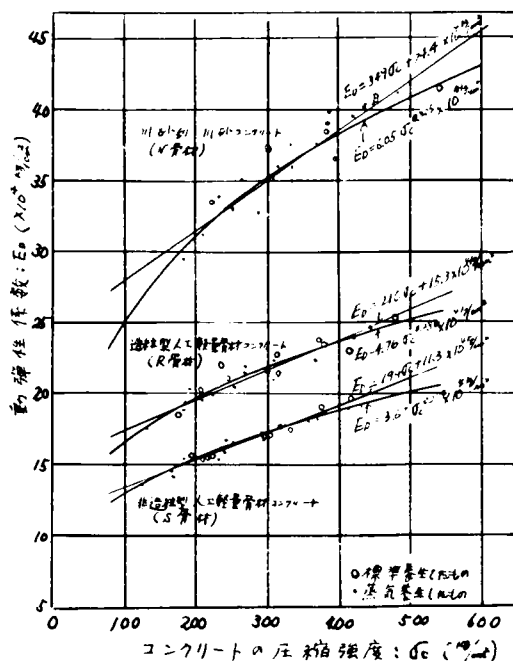
\* 材令7日から空中養生(相対湿度=50~55%)に移した。

蒸気養生によって材令1日の動弾性係数はかなり高くなるが、その後の伸びは少なく、材令7日では標準養生よりやや小さく、7日以後空中養生に移すと、コンクリートが乾燥するので動弾性係数は低下している。Hanson<sup>218)</sup>は、蒸気養生条件がコンクリートの静弾性係数におよぼす影響を調べ、圧縮強度の場合とほぼ同様であるが、影響の程度は小さくなると述べている。

Higginson<sup>235)</sup> は、コンクリートの静弾性係数やポアソン比を求め、圧縮強度が高いと弾性係数は増加すると報告している。

つぎに、スランプ 1～6 cm の川砂利、川砂コンクリートと造粒型、非造粒型の人工軽量骨材を用いたコンクリートを蒸気養生 ( $3+12.5h(15\text{ deg/h})+2(70^\circ\text{C})+1.5h$ ) および標準養生を行ない (p.165 参照)、 $\phi 10 \times 20\text{ cm}$  円柱供試体で動弾性係数を求め、圧縮強度との関係を示すと図-2.5.28 のようになる。<sup>359)</sup> 骨材の種類によって動弾性係数の値はことなるが、骨材が同じ種類のコンクリートであれば、動弾性係数と圧縮強度との関係は蒸気養生および標準養生ともほぼ同じ式で示される。また、すでに図-2.5.19、図-2.5.20 (p.203 参照) に示したように曲げ強度と動弾性係数、静弾性係数と動弾性係数との関係についても、蒸気養生、標準養生ともほぼ同一線上に図示されており、養生方法の相違の影響はみられない。

図-2.5.28 蒸気養生および標準養生した各種コンクリートの動弾性係数と圧縮強度との関係



## (2) その他の性質について

蒸気養生したコンクリートのクリープ、水密性、すりへり抵抗などの性質については既往の研究で述べたように、クリープは乾燥収縮と同様に蒸気養生によって低減され、水密性、すりへり抵抗は耐久性の場合と同様に蒸気養生後十分に湿潤養生を行なえば、標準養生と同程度とみなすことができる。

## § 9. 結 語

蒸気養生を行なったコンクリートの圧縮強度、曲げ強度、付着強度、曲げ引張ひずみ、乾燥収縮、耐久性、弾性係数などの諸性質について、使用材料、配合などをかえ、標準養生と比較して検討した結果をまとめるとつぎのとおりである。

- (1) 脱型時の強度とマチュリチーとの間には密接な関係があり、 $1000^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ まではマチュリチーの増加とともに強度は直線的に大となるが、この値以上になると強度増加率は低下する。また、マチュリチーと強度との関係はセメントの種類によってことなり、しかもごく初期材令の場合に

のみ適用ができる。

- (2) 脱型時に標準養生28日強度の50%の値をえるには、配合や養生条件によって多少ことなるが、普通セメントのコンクリートで800～900℃・h、早強セメントを用いたものでは、550～650℃・hのマチュリチーが必要である。
- (3) 蒸気養生を行なったコンクリートは長期材令への強度増進率が劣るので、材令7日で標準養生したものとはほぼ同じになり、材令28日では、標準養生強度よりおよそ10～15%低い値となっている。なお、促進剤を用いたコンクリートは蒸気養生効果が大で、材令28日における標準養生に対する強度低下率もごくわずかとなる。
- (4) 標準養生28日の曲げ強度および引張強度に対する蒸気養生したコンクリートの相対強度を求めると、材令2日でそれぞれ78%および72%、材令28日では95%と93%であり、圧縮強度に比べると蒸気養生による強度低下率は小さい。また、コンクリートの品質による強度差も圧縮強度に比べて小となる傾向がある。
- (5) 蒸気養生が付着強度におよぼす影響は、他の強度特性ほど顕著でなく、初期材令では標準養生よりわずかに強く、28日では逆に標準養生のほうがいくぶん高い。また、最高温度を高くしたり、蒸気養生期間を長くすると、付着強度の伸びは悪くなり、後養生の際にできるだけ湿潤養生を続けるのがよい。
- (6) 蒸気養生を行なうと材令1日の曲げ引張りによる降伏点ひずみは標準養生の値より $0.3\sim0.8\times 10^{-4}$ 程度増加するが、28日では逆に標準養生のほうが大となる。蒸気養生を行なうと材令1日以後のひずみの増加はきわめて少ない。
- (7) 乾燥収縮は蒸気養生によって低減するが、その割合は最高温度の高いほど、マチュリチーの大きいほど大である。セメント量を増加すると収縮は大となり、普通セメントより早強セメントを用いたコンクリートの収縮がいくぶん小さい。また、乾燥収縮は供試体の重量変化と密接な関係がある。
- (8) 蒸気養生を行なったコンクリートの凍害抵抗性は、蒸気養生後の湿潤養生期間を長くすれば標準養生を行なったものと大差なく、AEコンクリートにすると凍害抵抗性が改善される。また、人工軽量骨材コンクリートの凍害抵抗は、川砂利、川砂コンクリートに比べてかなり劣っている。
- (9) 初期材令におけるコンクリートの弾性係数は蒸気養生によって増加するが、長期材令への伸びは小さい。しかし、蒸気養生の弾性係数への影響は圧縮強度に比べて小さい。また、同一種のコンクリートの動弾性係数と圧縮強度との関係は、養生方法によってほとんど影響されない。
- (10) 蒸気養生したコンクリートのクリープは乾燥収縮と同様に低減される。また、水密性、すりへり抵抗、耐酸性などの諸性質は、蒸気養生後も十分な湿潤養生を行なえば、標準養生したものと大差ないとみなされる。

## 第6章 蒸気養生期間の短縮について

### § 1. 緒 言

今日、製品工場では、工程を短縮し、生産性の向上をはかるため、蒸気養生期間の短縮がきわめて重要な問題となっている。短時間の養生によって、所要の脱型強度をえるためには、高強度セメント、硬化促進剤などの使用やセメント量を多くし、水セメント比を小さくするなどの配合の改善のほかコンクリートの成形方法や蒸気養生方法を効果的に行なう必要がある。

高強度セメントの使用は、早期に高強度のえられるコンクリートを造るのに最適の方法であり、初期に高強度を要するPC製品では早強ポルトランドセメントが用いられている。すでに、第3章第2節(3)に述べたように材令1日で蒸気養生しないでおよそ $150 \text{ Kg/cm}^2$ の強度のえられる超早強セメントの使用は、養生期間の短縮にとくに効果的であると考えられ、その使用が大いに注目されている。<sup>402)</sup>硬化促進剤の使用もすでに述べたように蒸気養生効果をあげるのに有効であり、さびの危険性からPC製品、ひびわれの出やすい鉄筋コンクリート製品には使用できないが、一般の製品では短時間養生の場合その使用が考えられる。配合については、単位セメント量を多くし、単位水量を少なくした富配合の使用も、初期に高強度をえるのに有利である。

蒸気養生期間を短縮するためには、前養生期間、等温養生期間、冷却期間をできるだけ短くしなければならないが、温度上昇速度もコンクリートの品質に悪影響を与えない範囲内ではやくする必要がある。このためには、加熱時の熱膨張をできるだけ小さくするために単位水量を成形の許す範囲で少なくしたかた練りコンクリートを用い、膨張をある程度拘束する型わく養生が必要になる。また、マチュリチーと脱型時の強度との関係より、養生時間を短かくすれば最高温度を多少高くとらなければならない。とくに、12～14時間程度の期間内に2サイクルの型わくの回転を行なうためには、蒸気養生期間は4～6時間となり、最高温度は $80^\circ\text{C}$ 程度に高める必要があり、コンクリートの使用材料や配合と関連づけて、ごく短時間の養生について検討、考察を行なった。

また、短時間の蒸気養生期間を決定するためには、蒸気養生中のコンクリートの強度発現の様相を把握しておく必要があり、セメントの品質と促進剤の効果についても調べておく必要がある。

つぎに、型わくの取りはずしを早くするため蒸気養生は脱型に必要な最小強度のえられる期間とすると、その後所要の強度をえるまでの後養生の期間やストックヤードでの貯蔵期間が長くなることが考えられ、工場には広い敷地が要求されることになる。これを避けるためには、脱型強度をえるための1次の蒸気養生を行なったのち、適当な時期に2回目の蒸気養生を行ない所要の品質を早期にえることが考えられ、今後2段階の蒸気養生についても検討を進める必要があると思われる。

蒸気養生期間を短縮して無理な養生を行なうとひびわれが発生する危険性があり、Hanson<sup>218)</sup>は、前養生を短かくして無理な養生を行なうと円柱供試体の側面にひびわれを生じたと報告している。コンクリートにひびわれを生ずる場合、種種の原因があるが、蒸気養生期間の短縮と関連する問題として、蒸気養生中に発生するコンクリートのひびわれを取りあげ、この原因について考察し、これを防ぐための条件について、検討しなければならない。

本章では、従来より使用されてきたポルトランド系セメントを対象とし、使用材料、配合などを考慮し、養生期間の短縮、2段階の養生、ひびわれ発生などについて検討を行なった。

### § 2. 短時間養生を行なったコンクリートの強度

#### (1) 実験の概要

3.5～6時間のごく短時間の蒸気養生が、脱型時および長期材令のコンクリートの圧縮強度にお

セメントは普通セメント ( $C_3S = 54\%$ ,  $C_2S = 23\%$ ,  $C_3S = 8\%$ ,  $C_4AF = 10\%$ ,  
ブレン比表面積  $= 3250 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) と早強セメント ( $C_3S = 63\%$ ,  $C_2S = 19\%$ ,  $C_3A = 8\%$ ,  
 $C_4AF = 8\%$ ) とを用い、骨材は安倍川産の砂利 (最大寸法  $= 25 \text{ mm}$ , 比重  $= 2.65$ ) と荒川  
産の砂 (比重  $= 2.62$ , 粗粒率  $= 2.81$ ) を使用した。混和剤としては、減水剤のマイテール 100N,  
ポゾリス No. 5, 減水促進剤のポゾリス No. 10, 硬化促進剤の塩化カルシウム ( $CaCl_2$ ) などを用  
いた。コンクリートは単位セメント量およびスランプをかえた表 2.6.1 に示す配合のものを用  
いた。

セメントの種類	混和剤の種類	最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤使用量 (セメント量に対して)
							W	C	S	G	
普通 ポルトランド セメント	ブレン あるいは 強化カル シウム	2.5	2~4	-	49.3	4.3	148	300	836	1121	強化カルシウムの 場合1.5倍、2.5倍
		2.5	2~4	-	42.9	4.2	150	350	796	1113	
		2.5	2~4	-	37.5	4.1	150	400	760	1108	
		2.5	7~9	-	45.4	4.2	159	350	786	1100	
	ポゾリス	2.5	2~4	2.5~3.0	44.3	4.1	153	300	802	1167	ポゾリス6.5、0.5倍
		2.5	2~4	2.5~3.0	38.6	4.0	155	350	765	1158	ポゾリス6.5、0.5倍
		2.5	2~4	2.5~3.0	34.2	3.9	157	400	726	1150	ポゾリス6.5、0.5倍
		2.5	7~9	-	42.1	4.2	165	350	781	1086	強化カルシウムの場合1.5倍
	マイケー	2.5	2~4	2.5~3.0	58.6	4.0	155	350	765	1158	マイケー 100N 0.25倍
		2.5	7~9	-	47.1	4.2	165	350	781	1086	強化カルシウムの場合1.5倍
早強 ポルトランド セメント	ブレン あるいは 強化カル シウム	2.5	2~4	-	50.7	4.3	152	300	831	1113	強化カルシウムの 場合1.5倍、2.5倍
		2.5	2~4	-	44.6	4.2	156	350	752	1140	
		2.5	2~4	-	40.5	4.1	162	400	747	1086	
		2.5	7~9	-	47.1	4.2	165	350	781	1086	
	ポゾリス	2.5	2~4	2.5~3.0	47.0	4.1	141	300	794	1153	ポゾリス6.5、0.5倍
		2.5	2~4	2.5~3.0	41.1	4.0	144	350	754	1142	ポゾリス6.5、0.5倍
		2.5	2~4	2.5~3.0	37.0	3.9	150	400	713	1126	ポゾリス6.5、0.5倍
		2.5	7~9	-	47.1	4.2	165	350	781	1086	強化カルシウムの場合1.5倍
	マイケー	2.5	2~4	2.5~3.0	40.0	4.0	144	350	754	1158	マイケー 100N 0.25倍
		2.5	7~9	-	47.1	4.2	165	350	781	1086	強化カルシウムの場合1.5倍

図 - 2. 6. 1. 供試コンクリートの蒸気養生条件





セメント、水、表面乾燥飽水状態の骨材をあらかじめ20℃の恒温室に貯蔵し、可傾式ミキサを用いてコンクリートを練り混ぜたのち、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱形型わくに一層に詰め、振動数7500 vpmの棒形振動機を用いて締固めを行なった。供試体は成形後、蒸気養生そうに型わくごとに入れ、上面にガラス板をのせ図-2.6.1に示す条件を用いて短時間の蒸気養生を行なった。

蒸気養生そうから取り出した供試体は、ただちにセッコウキャッピングを行ない、30分後型わくを取りはずしひびわれ発生の有無を調べたのち試験に供した。7日および28日で圧縮強度試験を行なう供試体は、蒸気養生後水中養生を行なった。なお、比較のため標準養生供試体も作成し、試験した。

## (2) 実験結果とその考察

各種コンクリートについて3.5～6時間の蒸気養生を行ない、養生直後(4～6.5時間)、材令7日および28日で圧縮強度を求めた結果を表-2.6.2に示す。この結果にみられるように、

表-2.6.2 短時間の蒸気養生を行なった各種コンクリートの圧縮強度

養生 期間 (h)	配合 単位量 (kg)	材料種別	普通セメントを用いたコンクリート										早強セメントを用いたコンクリート									
			蒸気養生					標準養生					蒸気養生					標準養生				
			養生直後	7日	28日	養生直後	7日	28日	養生直後	7日	28日	養生直後	7日	28日	養生直後	7日	28日					
4	300	Plain	15	3.5	244	58	382	90	289	68	424	100	30	6.4	282	61	398	86	352	76	465	100
		Po.No.5	10	2.2	241	53	364	80	323	71	453	100	29	5.8	303	61	379	76	408	82	499	100
		CaCl <sub>2</sub> 1%	41	9.6	280	65	400	94	328	77	427	100	79	16.6	332	70	424	89	395	83	475	100
		CaCl <sub>2</sub> 2%	61	13	340	73	425	91	358	77	468	100	95	19	366	73	454	90	419	83	503	100
4	350	Plain	19	3.7	323	64	449	89	340	67	507	100	39	7.1	360	65	463	84	421	76	552	100
		Mt.100N	25	4.6	326	60	436	80	417	76	547	100	40	7.3	378	69	466	85	449	82	546	100
		Po.No.5	25	4.7	316	60	430	81	402	76	531	100	43	7.8	385	70	449	82	435	79	549	100
		Po.No.10	46	8.4	344	63	456	84	422	77	546	100	120	21	418	74	471	83	491	87	564	100
4	350	CaCl <sub>2</sub> 1%	54	10.4	367	71	470	91	396	77	517	100	150	22	408	74	485	89	431	79	548	100
		CaCl <sub>2</sub> 2%	88	15.8	423	76	543	98	461	83	555	100	185	30	467	77	576	95	523	86	608	100
		Plain	20	4.7	292	68	373	87	302	70	429	100	32	16.7	321	67	427	89	370	77	481	100
		CaCl <sub>2</sub> 1%	49	10.9	320	71	405	90	344	76	451	100	81	17	333	70	425	90	382	81	474	100
6	350	Plain	99	20	319	64	415	83	340	68	498	100	162	30	323	60	420	79	442	83	534	100
		Mt.100N	120	22	324	60	423	78	410	76	539	100	190	44	339	62	439	81	467	86	545	100
		Po.No.5	100	20	337	66	409	80	393	77	509	100	161	29	350	63	419	86	473	85	555	100
		Po.No.10	137	25	370	68	476	87	430	79	545	100	191	33	427	73	489	84	488	84	583	100
5.5	24	CaCl <sub>2</sub> 1%	157	30	373	70	477	90	415	78	529	100	212	39	434	80	487	90	426	79	540	100
		CaCl <sub>2</sub> 2%	171	31	416	76	535	97	447	81	551	100	252	44	456	79	563	97	499	86	581	100
		Plain	29	5.3	335	61	456	83	403	73	549	100	54	9.0	365	61	470	79	450	75	597	100
		Po.No.5	30	5.0	357	59	479	79	488	81	606	100	80	13	393	63	486	78	513	82	624	100
3.5	24	CaCl <sub>2</sub> 1%	81	14	430	72	540	91	445	75	595	100	163	27	520	85	594	97	545	89	615	100
		CaCl <sub>2</sub> 2%	139	22	498	78	636	100	528	83	636	100	231	33	564	81	685	99	586	84	694	100

- 注 1) ( ) は28日標準養生強度を100とした場合の各材令の強度比、すなわち相対強度  
 2) ・側面に横方向の微細ひびわれの認められた供試体とその数  
 3) 養生期間は普通セメントを用いた場合4hおよび6h、早強セメントでは3.5hおよび5.5h

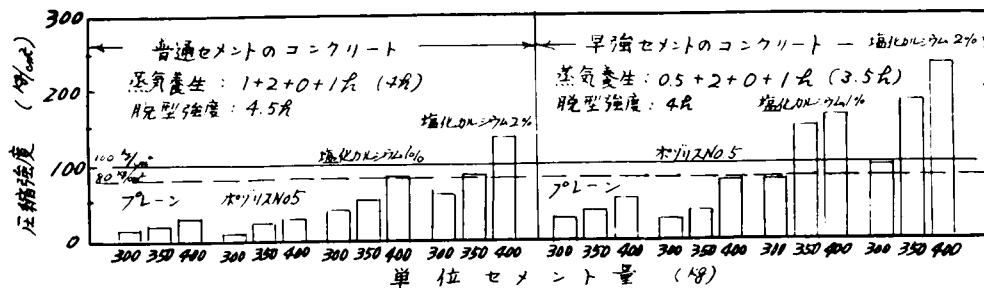
短時間養生によるコンクリートの強度はセメントの種類、単位セメント量、混和剤の種類などの配合によってかなりことなっている。製品の脱型強度は、その形状、寸法、工程などによってとなり、小型寸法のもものでは80～100 Kg/cm<sup>2</sup>、比較的小さいものでは、一般に100～120 Kg/cm<sup>2</sup>とされており、これに対する短時間養生の影響について考察した。

### 1) 短時間養生と脱型時の強度

図-2.6.2に示したようにごく短時間の蒸気養生を行なった場合の脱型時(成形後普通セメントコンクリートで4.5時間、早強セメントでは4時間)の強度は、早強セメントを用いたり単位セメント量をますことによって増加するが、促進剤の使用がもっとも効果的である。

4 時間養生で  $100 \text{ Kg/cm}^2$  以上の値をえるのに、普通セメントを用いたコンクリートでは単位セメント量  $400 \text{ Kg}$  の富配合とし塩化カルシウムを  $2\%$  添加する必要がある。早強セメントを

図 - 2.6.2 ごく短時間の蒸気養生を行なった各種コンクリートの単位セメント量と脱型時の圧縮強度



用いると  $350 \text{ Kg}$  の配合で  $1\%$  の添加でこの値がえられている。

つぎに等温養生期間を2時間とって6時間養生（早強セメントのコンクリートでは5.5時間）を行なった場合、脱型時の強度はかなり改善され、図 - 2.6.3 に示したように、普通セメントを用いたプレーンコンクリートでも単位セメント量  $350 \text{ Kg}$  の場合  $100 \text{ Kg/cm}^2$  に近い圧縮強度がえられている。これらの試験結果は最高温度  $80^\circ\text{C}$  の場合であり、 $60\sim 70^\circ\text{C}$  におさえる場合は養生時間をさらに長くする必要がある。また、コンクリートの単位水量をいくぶん増加し、スランプをおおよそ  $8 \text{ cm}$  とした場合の初期強度は図 - 2.6.4 にみられるように  $3 \text{ cm}$  目標のかた練りコンクリートに比べ、多少劣る結果を示している。

図 - 2.6.3 短時間養生の際の養生期間の相違による脱型強度の比較

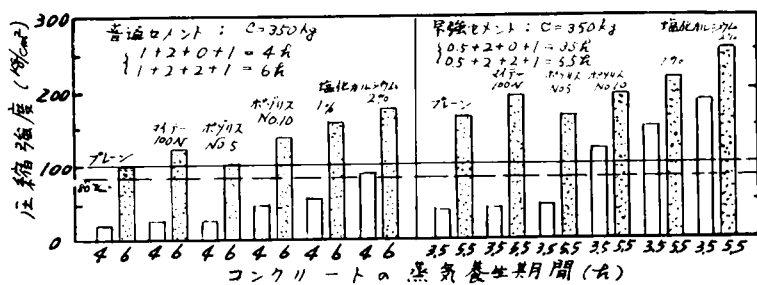
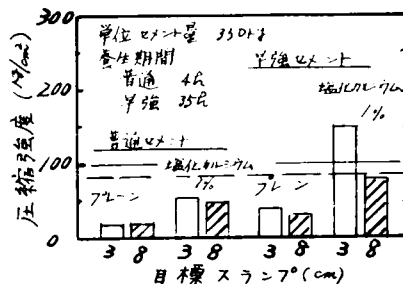


図 - 2.6.4 コンクリートのスランプと脱型時の強度



なお、短時間養生を行なったのち脱型した供試体についてその側面を観察した結果、表 - 2.6.2 に示したように、プレーンコンクリートおよび減水剤を用いたコンクリートでは、普通セメント、早強セメントいずれの場合も、供試体の上部に横方向  $10 \text{ mm}$  前後のひびわれが  $2, 3$  本発生したものがみられている。したがって、蒸気養生時間を短縮する場合でも、温度上昇速度を下げてもう少し蒸気養生条件をゆるやかにするか、きびしい条件では型わくの上面からふたをした密封型わく方式を採用する必要があることを示している。篠沢は、 $80^\circ\text{C}$  養生を行なう場合、 $0.2\sim 0.5 \text{ Kg/cm}^2$  程度のわずかな圧力でコンクリートを抑圧するときわめて効果的であると報告している。なお、促進剤の塩化カルシウムを用いたコンクリートにひびわれが認められないのに、減水剤を用いたものが比較的顕著であったが、これは Mielenz, Daugherty,

鈴木<sup>406)</sup>、川田<sup>407)</sup>らによって指摘されているように、有機化合物よりなる減水剤には、本来セメントの凝結を遅延させる効果のあるものが多いためと考えられる。また、脱型後水中養生し、材令7日および28日になってふたたびひびわれ面を観察すると、1, 2の供試体を除いて、ひびわれを認めることは困難であった。蒸気養生の際に生ずるひびわれの原因については第6節で述べる。

## 2) 短時間養生と材令7日および28日の圧縮強度

短時間の蒸気養生後、その供試体を材令7日および28日まで湿潤養生を続け、圧縮強度を試験した結果を、標準養生強度と比較すると、表-2.6.2にみられたように、材令7日では蒸気養生したものが標準養生したものよりやや小さくなり、材令28日では標準養生強度の76~100%の値となっている。各種コンクリートの中では、促進剤を用いたコンクリートの蒸気養生効果が大きく、その相対強度は平均93%となっている。各種コンクリートの中で、塩化カルシウムを用いたものを除くと、平均値は82%で、第5章、第2節(p.193参照)で報告した結果よりやや低い。しかし、短時間養生の場合、脱型時の相対強度はかなり低いが、以後湿潤養生を続ければ、材令7日あるいは28日にわたって強度の伸びはかなり顕著であり、短時間養生の場合には、蒸気養生後の湿潤養生いわゆる後養生をできるだけ長く行なうことが必要であると考えられる。

結局、短時間の蒸気養生について検討した結果をまとめると、早強セメントや促進剤の使用、配合比の改善などによって養生期間の短縮は可能であるが、経済配合の選定、ひびわれ発生などを考慮すると、プレーンコンクリートでは6時間が限度であり、少なくとも1時間の前養生をとり温度上昇速度をゆるやかにする必要がある、しかも早強セメントを使用するのがよい。

4時間前後の短時間養生では、熱膨張を拘束する密封型わく方式を採用する必要がある。とくに促進剤の使用は養生期間の短縮に効果的であり、無筋コンクリート製品には推奨できるが、鉄筋コンクリート製品では腐食の危険性の少なくなる減水促進剤が適当と考えられる。

なお、すでに述べたように超早強セメントを用いると5.5時間の短時間養生で、脱型時におおよそ150 Kg/cm<sup>2</sup>、材令1日では290 Kg/cm<sup>2</sup>程度の強度がえられており、経済性の問題はあるが短時間養生にはこの種セメントの使用も考慮する必要があると思われる。

## § 3. 蒸気養生期間と圧縮強度

### (1) 実験の概要

短時間養生についてさらに検討を進めるため、蒸気養生期間中の強度発現について、セメントの種類、混和剤などをかえた各種コンクリートを用いて実験を行なった。

#### 1) 使用材料と供試コンクリート

使用セメントは前節の実験に用いたものと同じ普通セメントと早強セメント、使用骨材も最大寸法25mmの安倍川砂利と粗粒率が2.81の荒川砂である。混和剤としては、塩化カルシウム、ポゾリスNo.5およびNo.10、マイテ-100Nおよび100Pを用いた。ポゾリスNo.10とマイテ-100Pは減水促進剤である。

コンクリートは、目標スランプを2~4cmとした表-2.6.3に示す配合を用い、容量50ℓの可傾式ミキサを用いて練り混ぜたのち、φ10×20cmの円柱形型わくに詰め、棒形振動機により締固め成形を行なった。

#### 2) 蒸気養生条件

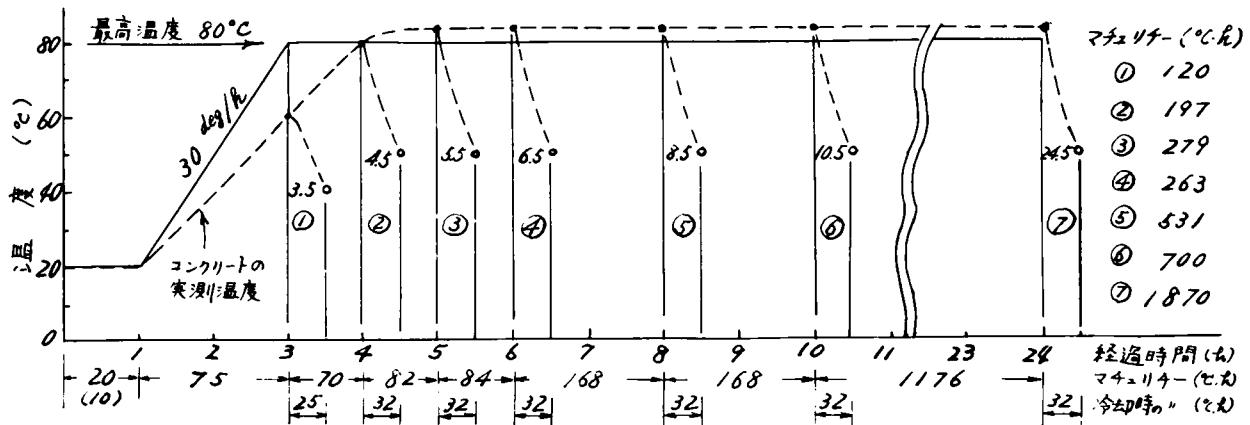
型詰め後、室温20℃の蒸気養生そうに入れ、養生時間の短縮を考え、普通セメントのコンクリートで1時間、早強セメントのコンクリートでは30分の前養生期間をとったのち30 deg/hの上昇速度で養生室の温度を最高温度80℃まであげ、サーモスタットを用いて温度を一定とし、成形後24時間まで80℃で等温養生を行なった。

表 - 2. 6. 3 使用したコンクリートの示方配合

使用 セメント	使用 混和剤	最大 寸法 (mm)	目 標 スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/h (%)	単 位 量 (Kg/m³)				混和剤 使用量 (%/C)	実 測 値	
							W	C	S	G		スランプ (cm)	空気量 (%)
普通	プ レ ー ン	25	2~4	—	42.9	42	150	350	796	1113	—	4.0	—
	塩化カルシウム	25	2~4	—	42.9	42	150	350	796	1113	1.0	3.5	—
	ボゾリス No.5	25	2~4	2.5~3.0	38.6	40	135	350	765	1158	0.5	2.5	4.5
	ボゾリスNo.10	25	2~4	2.5~3.0	38.6	40	135	350	765	1158	1.0	2.3	3.4
	マイテ-100N	25	2~4	2.5~3.0	38.6	40	135	350	765	1158	0.25	2.0	3.3
	マイテ-100P	25	2~4	2.5~3.0	38.6	40	135	350	765	1158	0.25	1.8	3.5
早 強	プ レ ー ン	25	2~4	—	44.6	42	156	350	752	1140	—	3.8	—
	塩化カルシウム	25	2~4	—	44.6	42	156	350	752	1140	1.0	3.0	—

蒸気養生中のコンクリート供試体は、蒸気養生室に入れてから、3、4、5、6、8、10および24時間で蒸気養生そうから取り出し、ただちにセッコウキャッピングを行なって、30分後に圧縮強度試験を実施し、養生期間中の強度発現の状態を調べた。なお、蒸気養生用のコンクリート供試体の中央にアルコール温度計を埋設して温度測定を行ない、供試コンクリートのマチュリチーも求めた。(図 - 2. 6. 5 参照)

図 - 2. 6. 5 コンクリート供試体の実測温度とマチュリチー



また、蒸気養生を行なわない標準養生供試体も作成し、材令28日の圧縮強度を調べた。

## (2) 実験結果の考察

各種コンクリートについて求めた養生期間と圧縮強度との関係を図 - 2. 6. 6 に示す。この結果にみられるように、使用したセメントの種類、混和剤の種類と使用の有無などによって蒸気養生中のコンクリートの強度発現の様相はかなりことなるが、脱型強度をかりに  $100 \text{ Kg/cm}^2$  として、これに要する蒸気養生期間を求めると表 - 2. 6. 4 のようになる。促進剤として塩化カルシウムを用いると成形後4時間で脱型強度がえられており、養生期間の短縮に効果的であるのがわかる。

等温養生期間を長くするにつれて各種コンクリートとも強度増進率が低下するので、最高温度での養生期間は数時間までが適当でその後は徐冷し、第4章、第5節で述べたようにその保温効

図-2.6.6 各種コンクリートの養生期間と圧縮強度

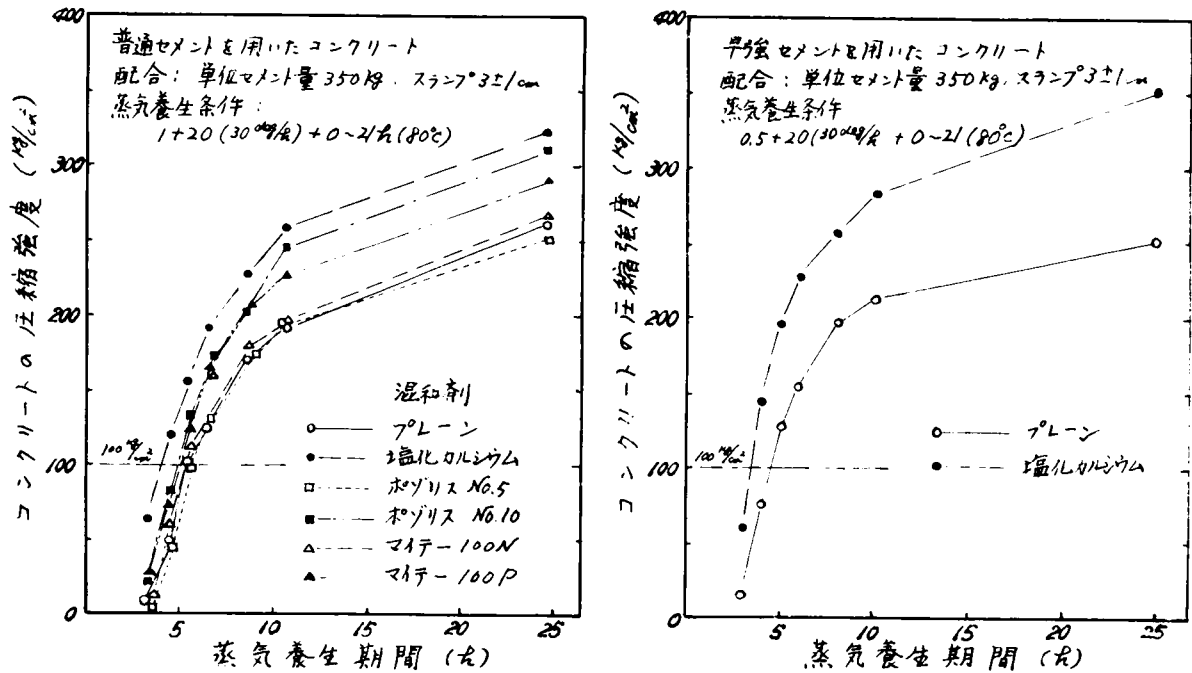


表-2.6.4 100 Kg/cm²の脱型強度をえるに必要な蒸気養生期間

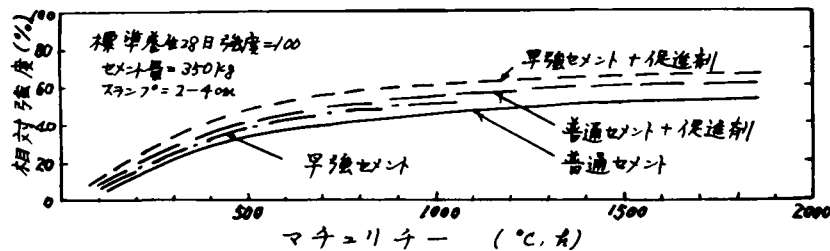
セメントの種類 混和剤 養生期間 (h)	早強セメント		普通セメント			
	プレーン	促進剤	プレーン	促進剤	減水促進剤	減水剤
	4.5	3.5	5.5	4.0	5.0	5.5

果を利用するのが望ましい。なお、前養生期間が短いと促進剤を用いないコンクリートではひびわれを生ずる危険性があるので、普通セメントのコンクリートで2時間、早強セメントの場合で1時間程度の前養生をとるか、前養生の短い場合は温度上昇速度をゆるくするのが望ましい。また、早強セメントの場合、高温で養生しても、その効果が普通セメントの場合ほど顕著でない。最高温度は多少低目にするのがよいと思われる。

なお、コンクリートの種類によって強度の絶対値がかなりことなるので、標準養生28日強度に対する相対強度とマチュリティーとの関係を示すと図-2.6.7のようになる。同じマチュリティーの場合、促進剤の塩化カルシウムや減水促進剤のポゾリスNo.10、マイター100Pなどを用いたコンクリートは相対強度が比較的大となり、蒸気養生効果の比較的良好を示している。なお、普通セメントのプレーンコンクリートでは、マチュリティー700℃・h前後で標準養生28日強度のおおよそ40%の値がえられており、これは第5章、第2節 (p.192 図-2.5.1 参照) で報告した結果とほぼ一致しており、また、早強セメントのコンクリートが普通セメントのものより相対強度が高くなる傾向もえられている。

以上の結果より、単位セメント量350 kgの普通セメントを用いたコンクリートであれば、脱型強度100 Kg/cm²をえるのに少なくとも6~7時間の養生が必要であり、早強セメントを用いた

図-2.6.7 蒸気養生中のマチュリチーと脱型時の相対強度



り、促進剤を加えると5時間程度に短縮が可能で、とくに両者の併用が有効である。

なお、さらに養生時間を短縮するにはReinsdorf<sup>191)</sup>、熊坂<sup>372)</sup>などの報告しているようにコンクリートの高温練りまぜを行ない、35～50℃で成形するのも効果的方法であり、超早強セメントの利用とともに今後検討する必要があると思われる。

結局、短時間の蒸気養生と養生期間中の強度発現について検討した実験結果より、普通セメントおよび早強セメントを用いたコンクリートについて、20℃常温成形で養生期間を短縮した場合の適当な蒸気養生条件を求めると、

普通セメントを用いたブレンコンクリートの場合、

前養生+温度上昇+等温+冷却期間=2+2(30 deg/h)+1(80℃)+2h=7h

早強セメントを用いたブレンコンクリートの場合、

前養生+温度上昇+等温+冷却期間=1+2(25 deg/h)+1(70℃)+2h=6h

となり、この条件を採用すれば、コンクリートの品質に悪影響を与えないで、蒸気養生直後に、100 Kg/cm<sup>2</sup>程度の脱型強度をえることが可能である。また、品質のよい促進剤や減水促進剤を用いると、脱型強度を高め、上記養生期間をさらに1時間程度短縮することができる。

#### § 4. 2段階の蒸気養生

##### (1) 実験の概要

1次養生によって脱型に必要な強度をえ、2次養生によって所要の品質をえる2段階の蒸気養生について検討した。<sup>408)</sup>

普通セメント(比重=3.15, ブレン比表面積=3100 cm<sup>2</sup>/g, 28日圧縮強さ=414 Kg/cm<sup>2</sup>)を用い、粗骨材は最大寸法20 mmの吉野川砂利、細骨材は粗粒率が2.81の吉野川砂を用いた。コンクリートは、振動締固め製品の配合を参考にして単位セメント量330 Kgでかた練りの表-2.6.5に示す配合とした。

表-2.6.5 使用したコンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の 範 囲 (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (Kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S		G
							5~1.2mm	1.2mm以下	
20	2~3	—	5.2	4.4	169	330	651	161	619
									419

注) コンクリートの練り上り温度 : 29℃

強制練りミキサを用いてコンクリートを練りまぜたのち、φ10×20 cmの円柱形型わくに1層に詰め、低振動数の振動台に6個型わくを固定して振動締固めを行なった。締固め条件は、振動

数 5 0 0 0 vpm，振幅 1.0 mm，加速度約 1 4 g とし、所定振動数での締固め時間は 2 0 秒とした。

所定の締固めを終了した供試体は実験用の養生そうに入れ、表 - 2. 6. 6 に示す 3 種の蒸気養生（1 次養生という）を行なった。蒸気養生の際には、型わくの上面はガラス板でふたをして養生

表 - 2. 6. 6 1 次養生の際の蒸気養生条件

養生条件	前養生期間 (h)	温度上昇期間 (h)	等温養生期間 (h)	徐冷期間 (h)	全養生期間 (h)	マチュリティー (°C・h)
I	2 0 °C - 3	2 0 deg/h - 2	6 0 °C - 3	1 0	1 8	8 7 0
II	2 0 °C - 2	2 0 deg/h - 2	6 0 °C - 2	3	9	4 2 0
III	2 0 °C - 1	2 0 deg/h - 2	6 0 °C - 1	2	6	2 8 0

を行なった。1 次養生を終えた供試体は 2 0 °C 恒温室に移し、キャッピングを行なったのち、成形後 2 4 時間で脱型時の強度試験を行なった。脱型後は 2 0 °C の水中養生に移し、材令 3 日あるいは 6 日で 2 回目の蒸気養生（2 次養生という）をつぎの条件で行なった。

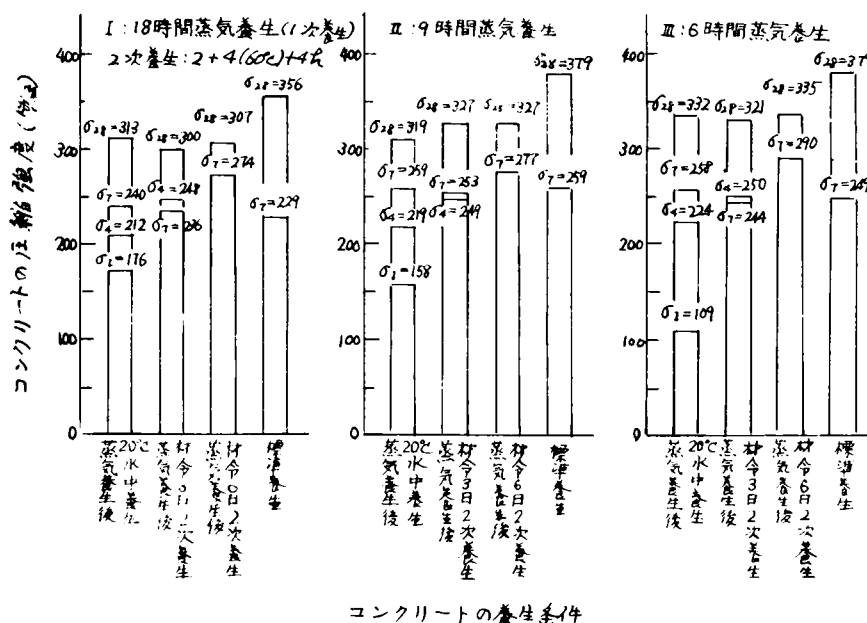
温度上昇 + 等温 + 冷却期間 =  $2 (20 \text{ deg/h}) + 4 (60 \text{ °C}) + 4 \text{ h} = 10 \text{ h}$  (マチュリティー 480 °C・h)

なお、蒸気養生後は原則として材令 2 8 日まで 2 0 °C 水中養生を行なったが、1 次養生後水中養生を行なわないで空中養生（相対湿度 = 7 0 ~ 8 0 %）の効果についても試験した。また、比較のため標準養生の強度も試験した。試験材令は、7 日および 2 8 日とし、蒸気養生の場合は脱型時の 1 日と 2 次養生後の 4 日についても試験し、供試体数は 1 材令について 3 個とした。所定材令になった供試体は、重量を測定したのち動弾性係数を求め、さらに圧縮強度試験を行なった。

## (2) 実験結果の考察

1 次養生の際の蒸気養生時間別に、養生条件と各材令の圧縮強度との関係を示した図 - 2. 6. 8 にみられるように蒸気養生期間を短かくしたほうが材令 1 日の強度は明らかに低い。しかし、材令 4 日および 7 日になると蒸気養生期間の長短による強度差はほとんどみられずほぼ同程度の値であり、材令 2 8 日になるとむしろ短時間養生のほうが強度は高くなる傾向がある。これは、す

図 - 2. 6. 8 1 次養生の養生期間別に示した 2 段階の蒸気養生とコンクリートの圧縮強度



でに指摘したように、高温養生によってセメント粒子の周囲に急速に発達する水和生成物の層が内部の未水和部分の長期における水和を妨げる主原因となるが、高温養生期間が長いほどこの影響が顕著にあらわれるためと考えられる。

1次養生後、材令3日および6日で2次養生を行なった結果を比較すると、図-2.6.8にみられるように材令6日で2次養生を行なったほうが7日、28日とも圧縮強度が高く、有利な結果がえられている。これは、水中養生期間が長くなり、1次養生後十分に湿潤養生されることが2次養生にプラスになったためと思われる。また、2次養生の効果は、とくに1次養生の際の蒸気養生期間が短いものほど顕著であり、材令7日、28日とも多少高い強度がえられている。

材令6日で2次養生を行なったコンクリートの7日強度は1回目の蒸気養生のみで以後湿潤養生したコンクリートの7日強度に比べて15%程度しか強度増進はみられないが、蒸気養生したコンクリートの材令28日強度のおおよそ90%の値がえられているので、これが設計基準強度を上回っておれば、早期出荷も十分可能になると考えられる。また、材令3日で2次養生した場合、材令4日と7日との強度に大差なく図-2.6.8にみられるように逆に7日が下回った値を示すものもあるが、これは、蒸気養生後ふたたび水中養生に移したために、乾湿の強度におよぼす影響が現われたものと思われる。

なお、材令28日になると1次養生のみのコンクリートの強度と2次養生を行なったものとはほぼ同じ値を示している。2段階の蒸気養生によってコンクリートのクリープや乾燥収縮はより低減できると考えられるがこの点はさらに検討をすすめる必要がある。

すでに、蒸気養生したコンクリートの材令28日の圧縮強度は、標準養生に比べて10～15%低くなることを報告したが、2段階の蒸気養生の結果でもほぼ同様であり12～16%低い値となっている。蒸気養生後、温度20℃、湿度70～90%の恒温室に供試体を放置し空中養生を行なった場合の圧縮強度は表-2.6.7に示したように20℃水中養生の結果は大差ない。

表-2.6.7 空中養生したコンクリートの圧縮強度と動弾性係数

養 生 シリーズ	蒸気養生 時間(h)	供試体重量 (kg)		圧 縮 強 度 (kg/cm <sup>2</sup> )		動弾性係数 (×10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	
		7 日	28 日	7 日	28 日	7 日	28 日
I	18	3.69 (3.74)	3.66 (3.75)	253 (240)	313 (313)	32.5 (34.3)	33.3 (36.2)
II	9	3.71 (3.75)	3.66 (3.76)	261 (259)	320 (319)	31.5 (33.2)	33.5 (37.1)
III	6	3.67 (3.73)	3.66 (3.74)	246 (258)	318 (332)	31.9 (34.5)	33.6 (37.1)

注) ( ) 内の値は20℃水中養生の値

これは、恒温室の相対湿度が比較的高かったこと、供試体表面の乾燥の影響などのためと思われる。なお、動弾性係数は空中養生したもののほうが水中養生供試体よりおおよそ10%低い値を示している。

結局、短期材令で所要の強度をえるのに2段階の蒸気養生は有利であり、型わくの回転率をあげるため初期の蒸気養生期間を短縮した場合、所要強度を早くえたい場合に行なうと効果的である。なお、2次養生は1次養生の際の養生期間の短いほど、また1次養生後の水中養生期間の長いほどその養生効果が大となる傾向がある。

## § 5. 短時間養生によるひびわれ発生について

### (1) ま え が き

一般に、コンクリートに発生するひびわれの原因はきわめて複雑で種種の原因が考えられるが、



大きくわけて①外力による場合、②温度応力（熱応力ともいう）による場合、③乾燥収縮による場合などが考えられる。

このうち、温度応力によるひびわれに関しては、小沢<sup>409)</sup>はダムコンクリートに生ずるひびわれとその防止対策について研究し、塚山<sup>410)</sup>もマッシブなコンクリートでは温度差の大きいときひびわれを生じることを示している。温度応力によるひびわれ発生の例はマッシブな土木構造物ではかなり多く、いくつかの事例が報告されており、<sup>302)</sup>護岸のコンクリートL形擁壁に生じた温度ひびわれについて現場測定を行ない報告した。<sup>411)</sup>なお、温度差のあった場合、部材に働く引張応力の理論式はTimoshenko<sup>412)</sup>らによって解析されている。

蒸気養生の際に、きびしい条件で養生した場合に生ずるひびわれも、内外の温度差による温度応力も関係していると思われるが、ごく硬化の初期に生じており、しかもコンクリートの性状が絶えず変化しており、この硬化の物理的、化学的過程とも関連しており、一般の硬化したコンクリート構造物の場合に比べてその原因も複雑であるが、蒸気養生の際の物性の変化と関連させ、ひびわれについて調査、考察を行なった。

## (2) 蒸気養生の際の熱膨張とひびわれ発生の可能性

コンクリートの短時間の蒸気養生の際に生ずるひびわれは、前養生期間がごく短かく、急激な加熱あるいは冷却を行なった場合にみられるので、コンクリート中の温度勾配とそれによる硬化過程とこの硬化に伴う熱膨張係数、弾性係数、クリープ、伸び能力などの物性の変化が影響していると考えられる。Keiser<sup>229)</sup>らは、加熱速度や冷却速度がはやいと、温度勾配が大となり、内部応力を生じてひびわれを発生すると報告しており、Goryainov<sup>216)</sup>らは、蒸気養生の際の破壊やひびわれの原因は熱膨張のためであると述べている。

まだ固まらないコンクリートは、骨材、セメントペースト、空けきに存在する自由水および不均一に分布した気ほうからなり、骨材の周囲を液相であるセメントペーストがとりまいている。コンクリートは、成形後、時間の経過とともにまた高温の蒸気養生によって化学的、物理的に状態が絶えず変化し、とくにセメントペーストは水和が進行し、それとともに液相からゲル化や結晶化によって固相に変り、硬化が進められる。

蒸気養生によって温度を上昇すると水和反応がコンクリートの表層から促進されるが、コンクリートを構成している各成分は必ず熱膨張を伴う。Reinsdorf<sup>182)</sup>は、60～80℃の温度範囲でセメント硬化体、水、湿った空気などの体積膨張係数としてそれぞれ $40 \sim 60 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ 、 $530 \sim 640 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ および $4000 \sim 9000 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ の値を示している。すなわち、水の容積膨張はセメント硬化体の約10倍であり、単位水量の多いコンクリートはそれだけ自由水が多くなるから、大きな熱膨張を示すことになり、前養生期間が短いほど顕著になる。したがって、成形後、凝結硬化を開始したばかりのコンクリートの熱膨張係数は、一般の硬化コンクリートで求められている $7 \sim 13 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ の値よりかなり大きくなることが考えられ、コンクリートの中心部に行くにつれて温度上昇が遅れるから、とくに急激な加熱を行なった場合、表層と中心部では、硬化の程度にかなりの差を生じ、熱膨張の値もことなるので、内部応力が働きひびわれを発生する原因になると考えられる。Goryainov<sup>216)</sup>らは、加熱の際の液相の熱膨張、気ほうの過度の膨張によって内部応力を生じることを指摘している。また、型わく養生を行なったコンクリートは、鋳や鑄鉄の熱膨張係数は $10 \sim 11 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$ であるから、ある程度型わくによって自由な膨張が拘束されるので悪影響が緩和されることが考えられる。しかし、即時脱型を行なった場合には、型わく養生より膨張が大きくなり、コンクリートの組織をゆるめることが考えられる。

温度上昇期間においては図-2.6.1に示したように供試体中心部の温度が遅れるが、等温養生期間内に室温においつき、逆に水和熱の作用によって、コンクリートの中心温度は室温より高くなり、冷却期間においては室温を下げるのでこの傾向はさらに顕著になる。コンクリートの温度

が外気より高ければ、コンクリート中の湿分は外部に移動し、表層部は急激な乾燥を受けることになる。Reinsdorf<sup>184)</sup>は、温度勾配がことなると、蒸気圧の平均化が温度のことなる面でおこり、コンクリート内部にも湿分の移動を生じ、外気温が低いとコンクリート中の水分が蒸発することを示している。

とくに、蒸気養生を行なった高温のコンクリートをいきなり低温の外気中に取り出すと、コンクリート表面が急冷され、大きな温度勾配を生じ、この温度差による温度応力と急激な乾燥による収縮応力とが働きひびわれを生ずる危険性がある。したがって、冷却時は養生室内で徐冷するのが望ましい。

このように蒸気養生の条件と方法によっては、コンクリートにひびわれを発生する可能性がある。つぎに、実際に生じたひびわれについて考察を行なった。

### (3) 蒸気養生の際に生じたひびわれに対する考察

#### 1) 短時間養生の際に発生した円柱供試体のひびわれ

本章、第2節の短時間養生の実験で、前養生期間をごく短かくし、温度上昇速度を $30\text{ deg/h}$ として型わく養生した場合、脱型時の供試体上面に写真-2.6.1に示したような位置に微細ひびわれが認められた。

前養生を短縮して急激な加熱を行なった場合、内部のコンクリートに比べて、熱伝導率のよい鑄鉄製型わくに接したコンクリートのごく表面の硬化が急激に進み、一種の皮のような硬化膜をつくり、この部分は熱膨張、クリープ、伸び能力などがまだ固まらないあるいは硬化中の内部コンクリートに比べて小さくなる。一方、内部コンクリートは自由水が多く、温度上昇の際の膨張も大であり、図-2.6.9に示したように型わくに拘束されていない上方にふくらみ、このとき型わく上方の上層のコンクリートに引張応力を与え、微細ひびわれを発生したものと

写真-2.6.1 急激な加熱によって生じた  
供試体側面のひびわれ

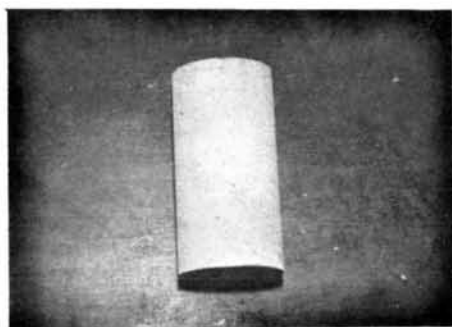
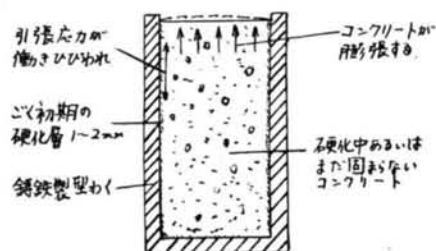


図-2.6.9 コンクリートの膨張による  
ひびわれ発生図



考えられる。なお、このひびわれは肉眼で観察するには困難なものもあるほど、きわめて微細であり、蒸気養生後に水中養生を材令7日あるいは28日まで続けた供試体ではひびわれが閉じ、見出すことが困難となっている。これはひびわれが、ごく表面的なものであり、その深さも最初の硬化膜に相当する表層の $1\text{ mm}$ 前後と思われる。Hanson<sup>218)</sup>は、このようなひびわれは、まだ固まらないコンクリート中の自由水の過度の膨張が大きな原因であると述べている。

結局、前養生の短かい場合、ひびわれ発生を避けるためには、温度上昇をゆるやかにする必要があると考えられる。

#### 2) 即時脱型を行なったはり供試体に発生したひびわれ

最大寸法 $20\text{ mm}$ の川砂利を用い、単位セメント量 $300\text{ Kg}$ 、単位水量 $112\text{ Kg}$ 、細骨材率 $45\%$ とした超かた練りコンクリートを $15 \times 15 \times 54\text{ cm}$ のはり供試体の作成できる即時脱型用型わ

くに詰め、振動数 10800 vpm で 1 分間締固め成形したのち即時脱型したもの、即時脱型しない型わく成形のものをそれぞれ蒸気養生そうに入れ、つぎの 3 種の条件で蒸気養生した結

前養生 + 温度上昇 (速度) + 等温 (最高温度) + 冷却期間

蒸気養生条件Ⅰ : 0 + 2.5 (28 deg/h) + 1 (90°C) + 1.5 h

蒸気養生条件Ⅱ : 1 + 2.5 (20 deg/h) + 2 (70°C) + 2 h

蒸気養生条件Ⅲ : 2.5 + 2.5 (20 deg/h) + 2.5 (70°C) + 2.5 h

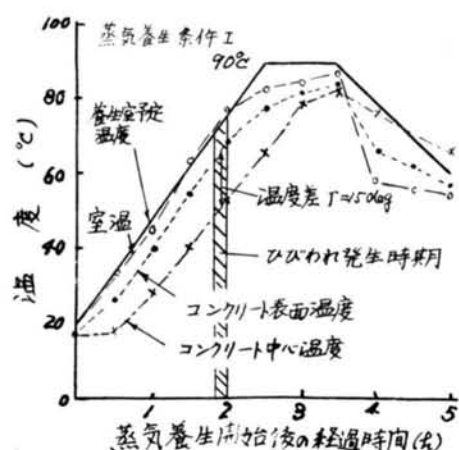
果、即時脱型を行なった供試体で、蒸気養生条件Ⅰの場合のみ、養生終了後に写真 - 2.6.2 に示したようなひびわれが認められた。

したがって、ひびわれ発生の原因とその時期を調べるためコンクリート供試体中央にアルコール温度計を埋め込み、表面にもセメントペーストで温度計をはりつけて、内外の温度変化をはかると同時に、コンクリート表面のひびわれ発生の有無を 10 分おきに観察した結果、図 - 2.6.10 に示したように蒸気養生開始後 1 時間 50 分から 2 時間の加熱期間中にひびわれが認められ、この時、コンクリート中心部と表面部との温度差は最大 15 deg であった。このように表層と中心部で高い温度勾配のあるため、型わくと接していなくても表面の硬化がごく早く、また、型わくによる拘束がないので内部のコンクリートの膨張も大きく、前述した円柱供試体の場合とほぼ同じ理由で、ひびわれが発生したものと思われる。加熱時の観測では、ひびわれはきわめて微細で、長さは 10 ~ 20 mm、深さは 1 ~ 2 mm 程度と考えられる。

写真 - 2.6.2 即時脱型を行なった供試体に養生直後にみられたひびわれの例



図 - 2.6.10 温度測定結果とひびわれ発生時期



このごく表層に引張応力を与えた原因とみられる 1 ~ 3 cm の深さのコンクリート中にカーボンひずみ計 (共和電業 KK 製、S - 10 F 型) を埋設し、養生開始後 2 時間 (温度 70 °C まで) にわたって、コンクリートの熱膨張を求めると、図 - 2.6.11 にみられるように、熱膨張係数は即時脱型したものでおおよそ  $22 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^{\circ}\text{C}$ 、型わく養生のものはやや小さく  $19 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^{\circ}\text{C}$  となっている。

また、ひびわれの深さを調べるためコンクリートをはつるともろく、ひずみ計埋設位置のコンクリートはようやく粘性が失われて固まりかけている状態が観察されている。

なお、ひびわれやコンクリートの変形の測定と同時に  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  の円柱供試体を型わく養生のものと、型わく側板をはずしたものとを養生そうに入れ、引張強度、圧縮強度、動弾性係数などを求めた結果を表 - 2.6.8 に示す。型わく養生の値がかなり大きいのが、これは型わくによる拘束の効果と、一方、即時脱型の場合、成形後側板をはずしたのでこれによるゆるみの

図 - 2. 6. 1 1 固まり始めたコンクリートの熱膨張の測定結果

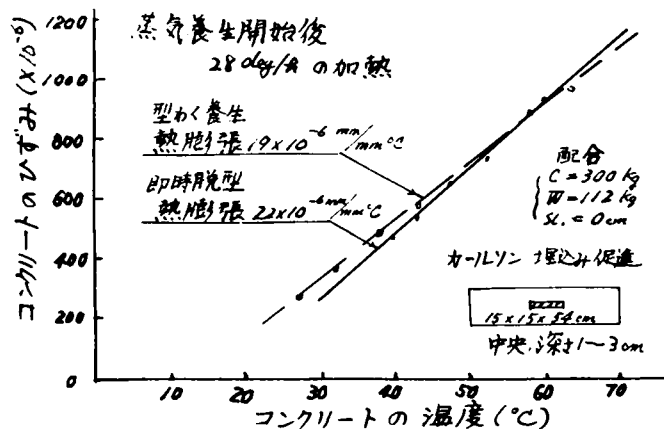


表 - 2. 6. 8 蒸気養生初期の強度と動弾性係数

養生方法	ひびわれ発生時 (1.8~2 h)			蒸気養生終了時 (5 h)		
	引張強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	動弾性係数 (Kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	動弾性係数 (Kg/cm <sup>2</sup> )
即時脱型	0.6	6.3	$1.7 \times 10^4$	8.6	71	$1.9 \times 10^5$
型わく養生	1.3	12.0	$2.4 \times 10^4$	17.8	102	$2.3 \times 10^5$

注) 蒸気養生条件:  $0 + 2.5 (28 \text{ deg/h}) + 1 (90^\circ\text{C}) + 1.5 \text{ h}$ , 供試体数 2 本の平均値

影響のためと思われる。熱膨張が普通のコンクリートのおおよそ 2 倍もあり、これが主原因となってひびわれを生じたものと思われる。

つぎに、冷却時に  $70^\circ\text{C}$  の状態より  $20^\circ\text{C}$  の恒温室の空中養生 (相対湿度 = 70%) に移した場合には、ひびわれの新たな発生は認められなかったが、加熱の際に発生したひびわれが、写真 - 2. 6. 2 のように成長し長くなる傾向がみられた。これは、冷却の際はコンクリート温度が高いので乾燥による収縮応力や温度応力が働くための影響と思われる。なお、実験的に  $90^\circ\text{C}$  の最高温度より 1.5 時間の冷却期間をとらないで  $20^\circ\text{C}$  に移した供試体では、新しく微細ひびわれの発生が認められており、養生終了時のコンクリート強度にもよるが、 $50^\circ\text{C}$  程度の温度差が限界ではないかと考えられる。

Reinsdorf<sup>182)</sup> は、冷却時の温度差は  $300 \text{ Kg/cm}^2$  以上のコンクリートで  $60^\circ\text{C}$ 、 $450 \text{ Kg/cm}^2$  以上のコンクリートでは  $75^\circ\text{C}$  まで許されると報告している。しかし、ACI Committee<sup>181) 187)</sup> 517 の報告に指摘しているように、できるだけ徐冷期間を長くとり、その保温効果を利用するとともに悪影響を避けるのが望ましいといえる。

#### (4) ま と め

蒸気養生中にコンクリートにひびわれを生ずるのは、前養生を短かくし急激な加熱を行なった場合に、温度勾配が大となり、まだ固まらないコンクリートの過度の熱膨張によって内部応力を生じ、表層のごく初期の硬化層に引張応力を与えるためや急激な冷却を行なった場合、表層コンクリートに温度応力や収縮応力の働くためと考えられる。これを防止するためには、前養生期間を少なくとも 1 時間はとり、温度上昇をゆるやかにたとえば  $20 \text{ deg/h}$  以下とし、最高温度も、

80℃以下におさえ、急冷を避けてできるだけ徐冷を行なうのがよいといえる。

## § 6. 結 語

1日2～3サイクルの型わくの回転を目標に、蒸気養生中の圧縮強度を測定し、養生期間の短縮について検討し、さらに2段階の蒸気養生、蒸気養生の際に生ずるひびわれの原因などについて調べた本章の結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 単位セメント量350Kgのプレーンコンクリートでは、4時間程度の短時間養生によって脱型強度100Kg/cm<sup>2</sup>をえるのは困難であり、80℃の最高温度の場合、普通セメントを用いたコンクリートで6～7時間、早強セメントを用いたものでは5～5.5時間の養生期間が必要であり、促進剤を添加すると1時間程度の短縮が可能になる。
- (2) 普通セメントのコンクリートで前養生を1時間、早強セメントでは30分とり、30deg/hの温度上昇速度で80℃まで加熱し、3.5～6時間のごく短時間養生を行なうと促進剤を用いないコンクリートでは微細ひびわれを生じており、前養生をそれぞれ2時間および1時間程度と長くするか、温度上昇速度をゆるやかにする必要がある。
- (3) 蒸気養生中の強度発現、短時間養生による養生直後の強度などに着目して、常温成形し養生時間を短縮した場合の蒸気養生条件（前養生＋温度上昇＋等温＋冷却期間）を示すと、  
普通セメントのコンクリート： $2 + 2(30 \text{ deg/h}) + 1(80^\circ\text{C}) + 2 \text{ h} = 7 \text{ h}$   
早強セメントのコンクリート： $1 + 2(25 \text{ deg/h}) + 1(70^\circ\text{C}) + 2 \text{ h} = 6 \text{ h}$   
が適当と考えられ、良質の促進剤や減水促進剤を用いると等温養生期間および冷却期間をそれぞれ30分程度短縮することができる。
- (4) 型わくの回転率を高め、早期に所要の品質をえるには、2段階の蒸気養生が効果的であり、1次養生の期間が短いほど、また1次養生後の水中養生期間が長いほど2次養生の効果は大きくなる傾向がある。
- (5) 前養生期間をごく短かくし、急激な温度上昇を行なったり、また急冷したりすると温度勾配が大となりひびわれを生じる。したがって、これを防止するためには、前養生を少なくとも1時間とり、前養生の短い場合には温度上昇速度を20deg/h程度とゆるやかにし、最高温度は80℃以下とし、できるだけ冷却期間を長くするのがよい。

## 第 7 章 超かた練りコンクリートの蒸気養生

### § 1. 緒 言

ブロック類、まくらぎ、無筋コンクリート管などの製品に用いる超かた練りコンクリートについてとくに即時脱型した場合に対する蒸気養生の影響について研究した結果はほとんどみられない。

超かた練りコンクリートは、一般の製品に用いるコンクリートに比較して、単位水量のきわめて少ないバサバサ状態の湿った土のようなコンクリートを用いるので、品質と関連して成形、施工上考慮すべき問題点があり、すでに強力な振動締固めの必要なことを第 1 編、第 7 章で報告した。一方、蒸気養生の影響については、単位水量や水セメント比がごく小となり、コンクリート中の自由水が少なくなるので、型わくのまま蒸気養生を行なう場合には、Butt<sup>184)</sup>らによって指摘されているように、ある程度、養生期間の短縮も可能になると思われる。しかしながら、即時脱型を行なったコンクリートでは、蒸気養生の際の熱膨張が型わく側板によって拘束されないので、型わく養生の場合とは蒸気養生条件が多少異なることが考えられ、超かた練りコンクリートの即時脱型の有無と最適養生条件については、今後十分に検討する必要がある。

つぎに、超かた練りコンクリートでは、ブロック類にみられるように単位セメント量が少ないとコンクリートがポーラスになり易く、このため水密性、耐久性などの劣ることも考えられる。また、強度特性、弾性係数、クリープ、乾燥収縮などについても究明しなければならない。

最近、ブロック用の混和剤も市販されているが、ごくかた練りのコンクリートにも混和材料を使用し、その締固め効果や充てん率をあげ、製品のはだ面を改善でき、しかも蒸気養生効果を高めることができれば、その品質向上にきわめて好都合であるが、超かた練りコンクリートに対する混和材料の使用方法についてはほとんど研究されていない現状である。また、超かた練りコンクリートを成形する場合、その詰り具合をよくして密実なコンクリートをえ、しかも蒸気養生期間をごく短縮するため、板状製品では加圧機を用いて加圧成形し、その圧力を保持したまま蒸気養生を行なういわゆる加圧蒸気養生（圧力養生、加圧養生などともいう）も行なわれており、国分ら<sup>413)</sup>によって加圧力と加圧時間、蒸気養生条件、加圧力の分布などについて研究結果が報告されている。加圧養生に対する混和材料の影響も検討する必要があると思われる。

超かた練りコンクリートを用い、即時脱型を行なう場合には、形がくずれたり変形しない配合が必要で、ゼロスランプの湿った土のような配合を用いるが、できるだけ充てん性がよく、即時脱型後の肌面の良好なものが望ましく、即時脱型用コンクリートの適正配合についても調査する必要がある。

したがって、本章では即時脱型製品に用いるゼロスランプの超かた練りコンクリートを対象として、

- (1) 超かた練りコンクリートの蒸気養生
- (2) 即時脱型を行なったコンクリートの蒸気養生
- (3) 超かた練りコンクリートの諸性質
- (4) 超かた練りコンクリートに対する混和材料の影響
- (5) 即時脱型用コンクリートの適正配合

などの問題点について、実験的検討を行なった。

### § 2. 超かた練りコンクリートの蒸気養生

- (1) 実験の概要

ゼロスランプの超かた練りコンクリートを用い、まず型わく養生の場合を中心に、蒸気養生条件の影響を調べた。<sup>414), 415)</sup>

#### 1) 使用材料とコンクリートの成形

普通セメント（比重＝3.15，ブレン比表面積＝3160 cm<sup>2</sup>/g，28日圧縮強さ＝416 Kg/cm<sup>2</sup>）を用い、粗骨材は最大寸法20 mmの鳴門市大麻町産の碎石、細骨材は吉野川産の川砂で、これらの品質は表－2.7.1のとおりである。使用コンクリートは表－2.7.2に示すようにゼロスランプの超かた練りで、単位セメント量は300 Kgと400 Kgの2種の配合を用いた。なお、コンシステンシーの測定は締固め係数試験装置で行ないCF値を求めた。

コンクリートの練りまぜは強制練りミキサで行ない、φ10×20 cmの円柱形型わくに一層に盛り込み、低振動数用の振動台を用いて、振動数5000 vpm、振動時間60秒の条件で締固め成形を行なった。なお、一部のものは加圧成形型わく（第1編、第7章、p.70 参照）に詰め、締固めを終えてから、加圧量15 Kg/cm<sup>2</sup>、加圧時間3分の条件で加圧成形して蒸気養生に移した（この方法を加圧養生、加圧蒸気養生などという）。なお、この圧力保持時間は20時間とした。また、締固め終了後、円柱形型わくの側板をはずして即時脱型を行なった供試体も作成した。

表－2.7.1 使用骨材の物理試験結果

骨材の種類	比 重	単位重量(Kg/m <sup>3</sup> )	吸水量(%)	空けき率(%)	粗粒率(FM)
粗骨材(碎石)	2.60	1530	1.30	40.5	6.50
細骨材(川砂)	2.62	1670	1.16	35.5	2.81

表－2.7.2 使用コンクリートの配合

配合No.	最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/A (%)	単 位 量 (Kg/m <sup>3</sup> )				CF値
					W	C	S	G	
Mix I	20	0	43.3	5.5	130	300	1081	878	0.77
Mix II	20	0	32.5	4.7	130	400	884	989	0.69

#### 2) 蒸気養生条件と圧縮強度

単位水量の少ないコンクリートでは養生期間の短縮がある程度可能であることがButt<sup>184)</sup>らによって報告されており、<sup>416)</sup>Riha、<sup>259)</sup>Semenovらも水セメント比の小さい、かた練りに配合を改善すると工程の短縮に効果があると述べているが、超かた練りの効果についてはまだ十分に検討されていないので、5時間の短時間養生も含めて、蒸気養生条件を表－2.7.3に示すように3種にかえて蒸気養生そうで養生を行なった。

表－2.7.3 超かた練りコンクリートの蒸気養生条件

蒸気養生 条 件	前養生期間 (h)	温度上昇期間 (h)	最高温度 (°C)	等温養生期間 (h)	冷 却 期 間 (h)	全養生期間 (h)	マチュリティー (°C・h)
I	2	2.5	70	3	3.5	11	550
II	1	2.5	70	2	2.5	8	420
III	0	2.5	70	1.5	1	5	340

蒸気養生後は翌日まで $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{deg}$ の湿空に放置したのち、所定材令まで水中養生を行なった。なお、比較のため材令28日の標準養生供試体も作成した。試験材令は1日、7日および28日とし、動弾性係数を求めたのち圧縮強度試験を行なった。

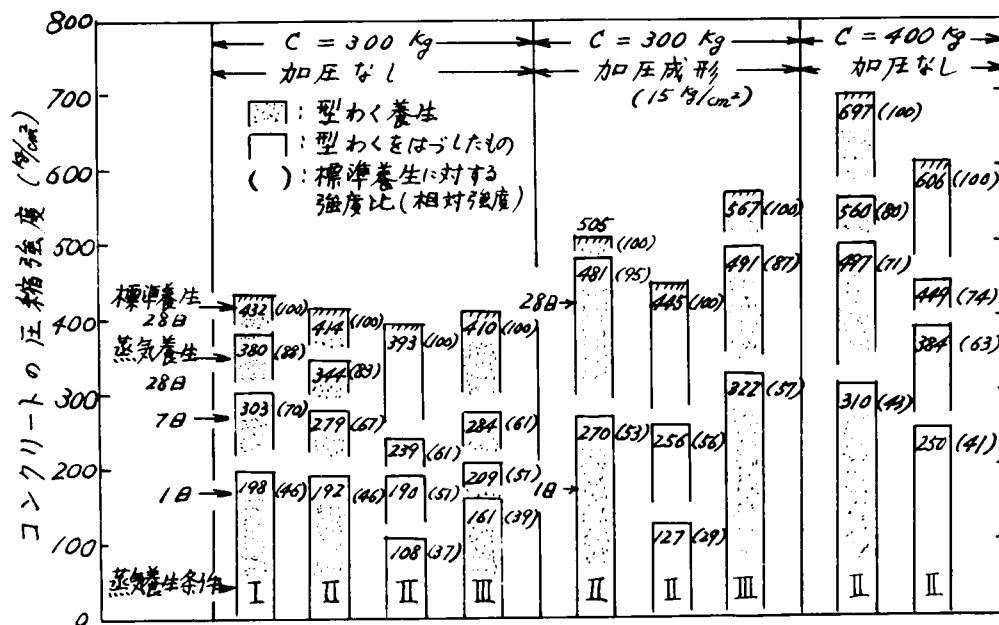
## (2) 実験結果とその考察

蒸気養生した超かた練りコンクリートの各材令の強度を標準養生の結果と比較し、加圧成形、型わくの側板を取りはずした場合も含めて図-2.7.1に示す。

### 1) 蒸気養生条件の影響

蒸気養生条件Ⅰ、Ⅱで型わくのまま養生した場合、図-2.7.1にみられるように、セメント量 $300\text{Kg}$ の配合で、材令1日で $198\text{Kg}/\text{cm}^2$ と $192\text{Kg}/\text{cm}^2$ の強度がえられており、標準養

図-2.7.1 超かた練りコンクリートの圧縮強度試験結果



生28日に対する強度比すなわち相対強度は46%となっている。材令7日で70%と67%、材令28日では88%と83%であり、かた練りコンクリートに対する強度比(ρ193参照)と大差ない。しかし、養生期間を短縮するため前養生なしで最高温度を $90^{\circ}\text{C}$ としたきびしい蒸気養生条件Ⅲでは、加圧しない場合、各材令の相対強度がかなり低く、単位水量のごく少ない超かた練りコンクリートでも前養生期間をとり、蒸気養生条件をゆるやかにしてやる必要のあることを示している。しかし、養生条件Ⅱの8時間養生で材令1日に $192\text{Kg}/\text{cm}^2$ の値がえられており、その後の強度発現も比較的よいので、たとえば、

前養生+温度上昇+等温+冷却期間 =  $1 + 2.5(20^{\circ}\text{deg}/\text{h}) + 1 \sim 2(70^{\circ}\text{C}) + 2\text{h}$ のような条件で、7時間前後に短縮することは可能と考えられる。なお、円柱形型わくの側板を締固め成形後、取りはずして養生したものは、標準養生28日も含めて各材令の強度がかなり低く、脱型時に組織のゆるみの影響があったものと思われ、即時脱型型わくを用いてスムーズな脱型を行なう必要のあることを示している。

### 2) 加圧成形、加圧蒸気養生の影響

加圧成形し、圧力を保持したまま、蒸気養生条件ⅡおよびⅢで蒸気養生を行なうと、図-2.7.1にみられるように、材令1日および28日とも強度が改善される。普通の成形方法の場



合との強度比を示した表-2.7.4のように養生条件のきびしいⅢの場合とくに高強度がえられており、加圧状態のコンクリートではごく短時間養生が可能で、前養生期間も必要でなく、急激な加熱が可能であることを示している。因分<sup>415)</sup>らも加圧蒸気養生では型わくがゆるまないよう

表-2.7.4 加圧成形、加圧養生の効果

成形・養生条件	型わく養生したもの						型わくをはずしたもの		
	蒸気養生：Ⅱ		標準養生	蒸気養生：Ⅲ		標準養生	蒸気養生：Ⅱ		標準養生
	1日	28日		1日	28日		1日	28日	
強度比 $\left(\frac{\text{加圧成形}}{\text{普通成形}} \times 100\right)$	157	140	122	200	173	123	118	107	113

注) Ⅱ：1+2.5+2(70℃)+2.5h, Ⅲ：0+2.5+1.5(90℃)+1h

固定すれば3時間の短時間で所要の強度がえられると報告しており、日本プレスコンクリート工業KK<sup>228)</sup>の報告では100℃の養生を実施している。なお、加圧成形後脱型した場合には、脱型方法に問題はあるが強度増加率が低く、表-2.7.4に示したように13%であり、加圧成形を行なう製品では、その圧力を蒸気養生の終るまで保持する工程が効果的であるのがわかる。

### 3) 単位セメント量の影響

蒸気養生は条件Ⅱを採用した場合、単位セメント量300Kgと400Kgとの強度を比較すると、富配合では材令1日で108Kg/cm<sup>2</sup>、材令28日では146Kg/cm<sup>2</sup>の強度増加がえられており、超かた練りコンクリートの強度改善にはセメントの増量がきわめて効果的であることを示している。なお、型わく養生に比べて強度はかなり低くなるが、貧配合コンクリートに比べると相対強度は高くなっている。

結局、超かた練りコンクリートの蒸気養生について検討した結果をまとめると、型わく養生を行なった場合の蒸気養生効果は、一般製品用コンクリートと大差ない。超かた練りにすると多少養生期間を短縮できるが、前養生期間をとり、養生条件もいくぶんゆるやかにする必要があり、ごく短時間の養生を行なう場合には、加圧成形したまま蒸気養生を行なうのがきわめて効果的である。また、セメントの増量も超かた練りコンクリートの強度改善に有効である。

## § 3. 即時脱型を行なったコンクリートの蒸気養生

### (1) 実験の概要

即時脱型型わくを用い、超かた練りコンクリートを成形後ただちに即時脱型し、蒸気養生の影響について検討した。<sup>415)</sup>

#### 1) 使用コンクリート

セメントは普通セメント(比重=3.15, プレーン比表面積=3160cm<sup>2</sup>/g, 28日圧縮強さ=412Kg/cm<sup>2</sup>)を用い、骨材は前実験と同様の碎石と川砂(粗粒率=2.81)を使用した。即時脱型に用いるコンクリートの配合は前実験の型わく養生の場合より単位水量を減少し119Kgとした表-2.7.5に示すものを用い、混和材料は加えなかった。

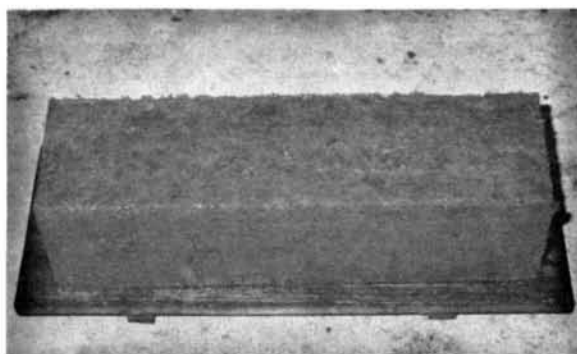
表-2.7.5 即時脱型用コンクリートの配合

配合No.	最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	CF値	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m <sup>3</sup> )			
						W	C	S	G
I	20	0	0.73	39.7	48	119	300	956	1030
II	20	0	0.69	29.8	42	119	400	802	1100

## 2) 即時脱型したコンクリート供試体の作成

強制練りミキサを用いて、モルタルで1分、粗骨材を入れて1分30秒練りまぜを行なったのち、第1編、第8節に述べた $\square 15 \times 15 \times 54 \text{ cm}$ はり供試体の作成できる即時脱型型わくを用い、高振動数バイブレーター（振動数10800 vpm、型わくの平均加速度15 g）を作動して1分間締固めを行なったのち、即時脱型を行ない、写真-2.7.1のようなコンクリートはり供試体を作成した。

写真-2.7.1 即時脱型を行なったコンクリート供試体



## 3) 蒸気養生条件と試験

即時脱型したコンクリートはり供試体は、底板にのせたまま実験用養生そうに入れ、つぎの条件で蒸気養生を行なった。

蒸気養生条件Ⅰ： $2 + 2.5(20 \text{ deg/h}) + 2.5(70^\circ\text{C}) + 3 \text{ h} = 10 \text{ h}(510^\circ\text{C} \cdot \text{h})$

蒸気養生条件Ⅱ： $1 + 2.5(20 \text{ deg/h}) + 2(70^\circ\text{C}) + 2 \text{ h} = 7.5 \text{ h}(395^\circ\text{C} \cdot \text{h})$

蒸気養生条件Ⅲ： $0 + 2.5(28 \text{ deg/h}) + 1(90^\circ\text{C}) + 1.5 \text{ h} = 5 \text{ h}(350^\circ\text{C} \cdot \text{h})$

蒸気養生後は $20^\circ\text{C}$ の恒温室に移し、翌日より $20^\circ\text{C}$ 水中養生を行なった。材令28日で、 $\square 15 \times 15 \times 54 \text{ cm}$ はり供試体の曲げ強度試験を行なったのち、その折片については圧縮強度も求めた。なお、比較のため $\square 15 \times 15 \times 54 \text{ cm}$ のはり型わくを用い、ワッカー振動台で振動数、10800 vpmで1分間締固め成形し、型わくのまま養生した供試体と、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体も作成し、材令28日で試験した。

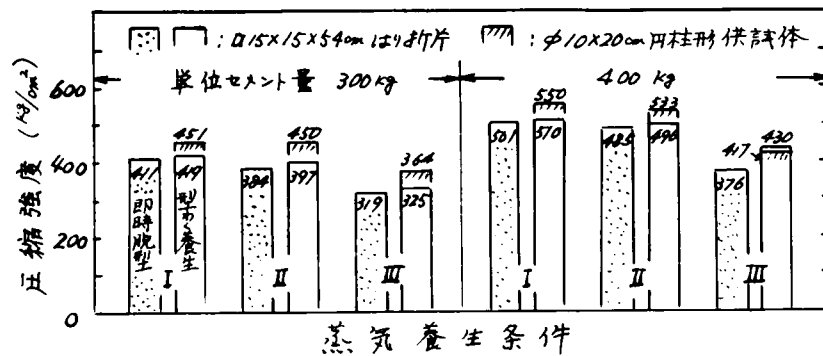
## (2) 実験結果とその考察

### 1) 蒸気養生条件と圧縮強度について

蒸気養生条件をかえて蒸気養生した即時脱型コンクリートの圧縮強度を型わく養生の結果と比較して示した図-2.7.2にみられるように、前養生期間を2時間あるいは1時間とり、温度上昇速度を $20 \text{ deg/h}$ とした蒸気養生条件ⅠおよびⅡでは、即時脱型したコンクリートと型わく養生のものとの結果に大差ない。Ⅰ、Ⅱの蒸気養生条件を比較すると、前養生の長いⅠがⅡよりわずかに高くなっているが、両養生条件に大差ない。この傾向は、単位セメント量 $300 \text{ Kg}$ および $400 \text{ Kg}$ のコンクリートともほぼ同様である。

一方、蒸気養生期間を短縮するために、前養生をとらないで温度上昇速度を $28 \text{ deg/h}$ 、最高温度 $90^\circ\text{C}$ としたきびしい条件Ⅲで蒸気養生を行なったものは、28日強度が養生条件Ⅰ、Ⅱに比べて $20 \sim 25\%$ 低下しており、しかも即時脱型したものでは前章第5節に述べたように、供試体の上面長手方向に微細ひびわれの発生が認められた。このひびわれは蒸気養生後材令28日まで水中養生した供試体では、ひびわれが閉じ、ほとんど見わけがつかなくなっており、ごく表面的なものと思われるが、急激な加熱により組織のゆるみを生じ、強度低下を伴うので、即時脱型したコンクリートではとくに、1～2時間前養生をとり、温度上昇をゆる

図 2.7.2 即時脱型の有無と蒸気養生条件をかえて養生したコンクリートの材令 28 日の圧縮強度



やかにし、最高温度も押える必要がある。なお、蒸気養生条件 II ではひびわれの発生は認められなかった。

## 2) 蒸気養生条件と曲げ強度について

即時脱型した  $15 \times 15 \times 54$  cm はり供試体を 3 種の蒸気養生条件で養生し、曲げ強度を求めた結果を、型わく養生の値と比較して表 2.7.6 に示す。この結果にみられるように、養生条件 I, II, III ときびしくするにつれて曲げ強度は低くなっており、とくに養生条件 III では I に比べて 10 ~ 17 % 低い値となっている。また、型わく養生に比べて即時脱型を行なうと平均 17 % 曲げ強度が減少しており、同じ供試体の折片圧縮強度の結果と比較すると差が大きい

表 2.7.6 即時脱型の有無と材令 28 日の曲げ強度

配 合		Mix I (C=300Kg)		Mix II (C=400Kg)	
脱 型 方 法		即 時 脱 型	型 わ く 養 生	即 時 脱 型	型 わ く 養 生
蒸 気 養 生 条 件	I	62.7 * (77)	81.1 (100)	72.3 (86)	83.7 (100)
	II	60.0 (80)	75.3 (100)	67.2 (87)	77.5 (100)
	III	56.8 (84)	67.3 (100)	63.0 (84)	74.9 (100)

注) \* ( ) 内は即時脱型と型わく養生との強度比

が、これは曲げ強度に対して即時脱型の際の供試体のねじれの影響があったのではないかと思われる。なお、曲げ圧縮比を求めると  $1/6 \sim 1/7$  となっている。

結局、即時脱型を行なったコンクリートを蒸気養生する場合には、単位水量のごく少ないコンクリートを用いているものの型わくによる拘束がないので、前養生期間を 1 ~ 2 時間とり、温度上昇をゆるやかにして急激な加熱をさけ、冷却時も温度差が大きくならないよう最高温度を低目にする必要があり、無理のない蒸気養生を行なえば、型わく養生と大差ない圧縮強度をえることができる。

## § 4. 超かた練りコンクリートの諸性質

### (1) ま え が き

蒸気養生を行なった超かた練りコンクリートの圧縮強度以外の引張強度、曲げ強度などの強度特性、弾性係数、乾燥収縮、クリープ、水密性などの諸性質に関する研究結果は、木村ら<sup>134) 135)</sup>が強度

特性、乾燥収縮、クリープなどについて報告し、三浦<sup>417)</sup>がP Cまくらぎの乾燥収縮やクリープについて研究を行なっているが、研究報告がきわめて少ないので、標準養生の結果と比較し、また、即時脱型の結果も2,3加えて検討を行なった。

なお、蒸気養生条件は比較的養生期間が短かく、しかもコンクリートの圧縮強度に悪影響のみられなかった蒸気養生条件Ⅱを採用し諸性質を調べた。また、使用材料やコンクリートはクリープ試験以外は、第2節および第3節に述べたものを使用し、乾燥収縮、クリープおよび水密性の試験では、比較のために目標スランプ5 cmの一般製品用コンクリートも使用した。

## (2) 曲げ強度および引張強度について

第2節の表-2.7.2に示した砕石を用いた超かた練りコンクリートを $10 \times 10 \times 40$  cmのはり型わくに盛り込み、振動数5000 vpm、振動時間60秒で振動台で締固め成形し、蒸気養生条件Ⅱで養生し、材令1日および28日で曲げ強度を求めた結果を表-2.7.7に示す。材令1日で、配合Ⅰで $47.1 \text{ Kg/cm}^2$ の曲げ強度がえられており、その相対強度は73%で、材令28日では98%であり、圧縮強度の値に比べて高い。また、はり折片の圧縮強度より曲げ圧縮比( $\sigma_b/\sigma_c$ )を

表-2.7.7 超かた練りコンクリートの曲げ強度

配合No.	単位セメント量 (Kg)	蒸気養生 (1+2.5+2(70℃)+2.5 h)				標準養生	
		1 日		28 日		28 日	
		$\sigma_b(\text{Kg/cm}^2)$	$\sigma_b/\sigma_c$	$\sigma_b(\text{Kg/cm}^2)$	$\sigma_b/\sigma_c$	$\sigma_b(\text{Kg/cm}^2)$	$\sigma_b/\sigma_c$
Mix I	300	47.1 (73)	0.13	62.8 (98)	0.16	64.8 (100)	0.14
Mix II	400	52.6 (67)	0.12	70.0 (89)	0.12	78.5 (100)	0.12

注) ( ) 内標準養生28日強度に対する強度比(相対強度)

求めると0.12~0.16の値であり従来、かた練りの舗装用コンクリートでえられたセメント技術協会の結果<sup>132), 418)</sup>に比べて大差ない値を示している。

つぎに、 $\phi 10 \times 20$  cmの円柱供試体について、曲げ強度の場合と同じコンクリートで、成形および養生条件も同一とし、材令1日、7日および28日で引張強度を求めると表-2.7.8のとおりである。相対強度は材令1日で66%と74%、材令28日では87%と102%であり、圧縮強度の値に比べて大となっている。なお、 $\sigma_t/\sigma_c$ を求めると蒸気養生では $1/8 \sim 1/12$ 、標準養生28日では $1/11 \sim 1/15$ となっており、蒸気養生を行なったコンクリートの初期材令では、この比が大となる傾向がある。

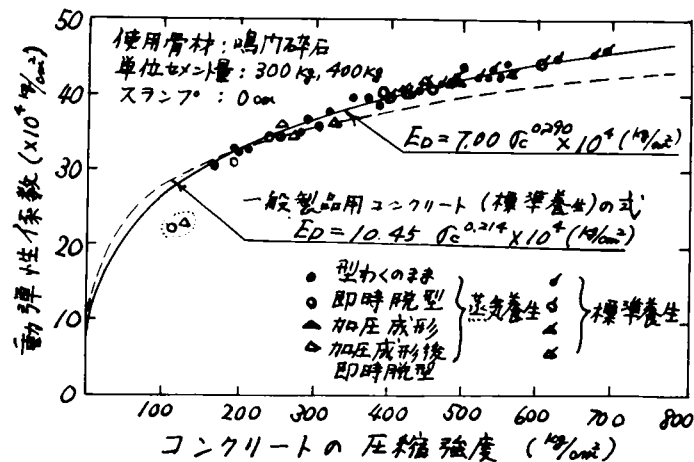
表-2.7.8 超かた練りコンクリートの引張強度

配 合	単位セメント量 (Kg)	コンクリートの引張強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )			
		蒸気養生 (1+2.5+2(70℃)+2.5 h)			標準養生
		1 日	7 日	28 日	28 日
Mix I	300	26.9 (66)	31.5 (70)	35.4 (87)	40.5 (100)
Mix II	400	35.4 (74)	37.5 (79)	48.5 (102)	47.5 (100)

## (3) 動弾性係数と圧縮強度との関係

超かた練りコンクリートに対する蒸気養生条件の影響を $\phi 10 \times 20$  cm円柱供試体を用いて検討した本章第2節および第3節の実験で圧縮強度試験の前にヤング率測定器を用いて動弾性係数を求めたので、この値と圧縮強度との関係を配合、成形方法、養生条件などのことなるコンクリ

図 - 2.7.3 超かた練りコンクリートの動弾性係数と圧縮強度との関係



ートについて示すと図 - 2.7.3 のとおりである。圧縮強度の範囲が、即時脱型したもの 2 個を除くと 150 ~ 700  $\text{kg/cm}^2$  の広範囲にわたり、実験値は指数曲線上にプロットされているので、両者の関係を最小 2 乗法によって求めると次式で示される。

$$E_d = 7.00 \sigma_c^{0.290} \times 10^4 \quad \dots\dots\dots (1.7.1)$$

ここに  $\begin{cases} E_d : \text{動弾性係数 (kg/cm}^2\text{)} \\ \sigma_c : \text{圧縮強度 (kg/cm}^2\text{)} \end{cases}$

すでに一般製品用コンクリートの場合について使用骨材が同じであれば、蒸気養生、標準養生によってえられた動弾性係数と圧縮強度との関係は同一の指数式で示すことができると報告した (p212 図 - 2.5.28 参照) が、本実験の碎石を用いた超かた練りコンクリートでも、養生条件の相違にかかわらず、さらに成形方法がことなっても、両者の関係を同じ式で示すことができるという結果がえられている。なお、木村らは<sup>134)</sup> 静弾性係数と圧縮強度との関係を指数式で求めており、400 ~ 1200  $\text{kg/cm}^2$  の高強度コンクリートでは直線式で示してもよいと述べている。

また、同じ岩種の碎石を用いた一般製品用コンクリートの結果 (第 1 編、第 4 章、第 3 節 p. 33 参照) と比較すると、この場合には混和材料も用いているが、100 ~ 300  $\text{kg/cm}^2$  では大差ないが高強度になると多少ことなつた値を示している。

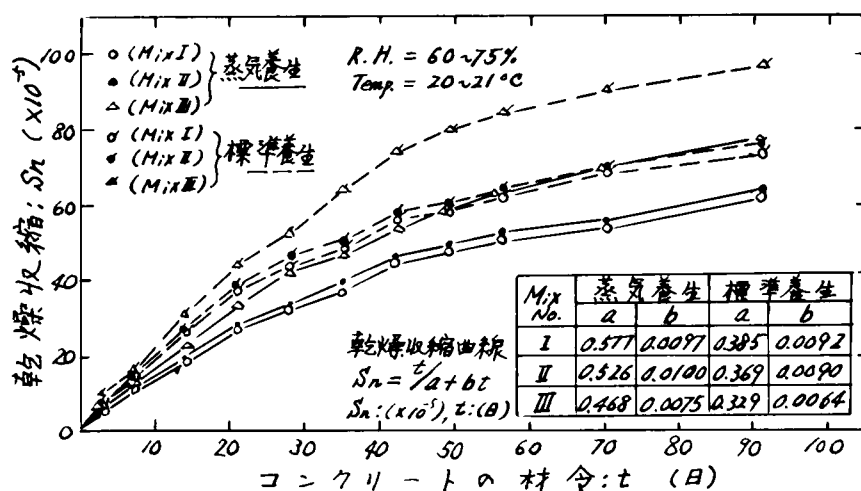
#### (4) 乾燥収縮

##### 1) 超かた練りコンクリートの乾燥収縮

表 - 2.7.2 に示した単位セメント量のことなる 2 種の超かた練りコンクリート (Mix I, II) と比較のために一般製品用配合の Mix III (目標スランプ 5 cm, 単位セメント量 300 kg, 水セメント比 62.7%, 細骨材率 50%) を  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$  のはり供試体に詰め、曲げ強度の場合と同様の条件で締固め成形し、蒸気養生条件 II (1 + 2.5 + 2 (70 °C) + 2.5 h) で養生したのち翌日脱型して材令 7 日まで水中養生を行ない、7 日以後温度 20 ~ 21 °C、相対湿度 60 ~ 75 % の空中で乾燥養生して、コンパレータ法により乾燥収縮ひずみを測定した。なお、蒸気養生の結果と比較するため、蒸気養生しないで材令 7 日まで標準養生した供試体についても測定を行なった。乾燥収縮ひずみの測定結果を図 - 2.7.4 に示す。

材令 9 1 日までの測定結果では、超かた練りコンクリートの乾燥収縮は、スランプ 5 cm の一般製品用のものより明らかに小さく、標準養生した場合で 24 %、蒸気養生したもので約 20 % 減少している。また、乾燥収縮曲線より求めた終極ひずみ ( $1/b \times 10^{-5}$ ) でも、超かた練りコンクリートが明らかに小さい (図 - 2.7.4 参照)。これは、超かたコンクリートでは単位

図-2.7.4 蒸気養生および標準養生したコンクリートの乾燥収縮



水量が一般製品用コンクリートに比べてかなり少なく、したがって、コンクリート中の自由水（遊離水ともいう）が少なくなるためである。また、富配合コンクリートの Mix II では、セメント量の少ない Mix I より材令 91 日までの乾燥収縮はいくぶん大きい。しかし、終極ひずみは大差ない結果を示している。

なお、蒸気養生を行なうと標準養生に比べて、超かた練りコンクリートで 15~16%、一般製品用コンクリートで 20% 乾燥収縮が減少しており、蒸気養生による乾燥収縮低減の効果は、単位水量の多いコンクリートのほうが多少顕著になる結果がえられている。

## 2) 即時脱型を行なったコンクリートの乾燥収縮

即時脱型を行なったコンクリートの乾燥収縮を調べるため、表-2.7.5 に示した配合 I のコンクリート（C = 300 Kg, W = 119 Kg, W/C = 39.7%）を 10×10×40 cm のはり型わくに詰め、ワッカー振動台に取り付け、振動数 10800 vpm、振動時間 60 秒の条件で締固め成形したのち、ただちに 20°C の蒸気養生そうに入れ、型わく側板を静かに取りはずし、即時脱型した供試体と即時脱型しないで型わくのまま養生するもの各 3 本つくり、つぎの条件、

前養生 + 温度上昇 + 等温 + 冷却期間 = 1 + 2.5 (20 deg/h) + 2 (70°C) + 2h

を用いて蒸気養生したのち、翌日脱型して 20~21°C、相対湿度 60~70% の空中で乾燥養生し、長さ変化をコンパレータ法で測定した。なお、材令 7 日まで標準養生のみの供試体も作成し、蒸気養生の乾燥収縮と比較した。また、乾燥収縮の測定材令で供試体重量をはかり、重量減少率も求めた。

即時脱型を行なったコンクリートと型わく養生を行なったものについて材令 91 日までの乾燥収縮を測定した結果は図-2.7.5 のとおりである。この結果にみられるように、即時脱型したコンクリートの乾燥収縮が型わく養生のものよりやや大きく、この傾向は蒸気養生を行なった場合のほうが標準養生の場合より顕著である。

また、材令 28 日および 91 日における供試体の重量減少率を求めると、表-2.7.9 のように標準養生ではほぼ同じであるが、蒸気養生を行なった場合には即時脱型したものがやや大きく、蒸気養生の際の組織のゆるみの影響もあるのではないと思われる。

なお、蒸気養生を行なったコンクリートは標準養生を行なったものに比べて、材令 91 日までの結果では、17~22% 平均で 20% 乾燥収縮が小となっており、前実験と大差のない結果を示している。

図 - 2. 7. 5 即時脱型および型わく養生を行なったコンクリートの乾燥収縮

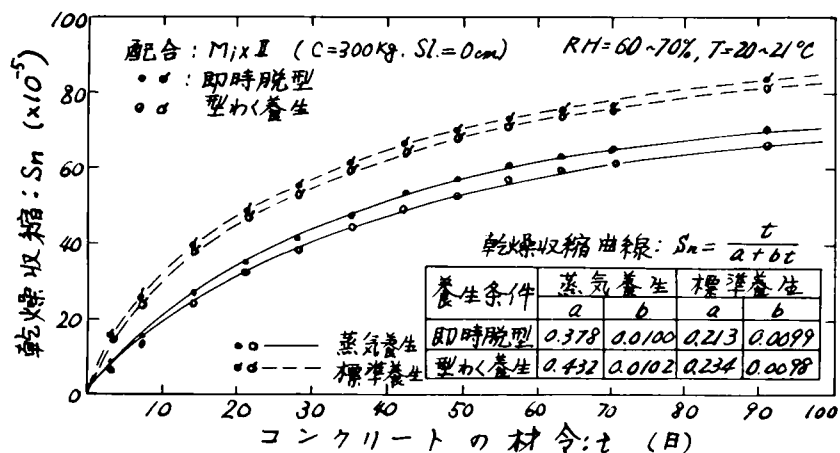


表 - 2. 7. 7 乾燥収縮測定供試体の重量減少率 (%)

乾燥材令 (日)	蒸気養生 (1+2.5+2+2 h~20°C水中)		標準養生 (20°C水中)	
	即時脱型	型わく養生	即時脱型	型わく養生
28	1.41 (40.9 $\times 10^{-5}$ )	1.37 (38.1 $\times 10^{-5}$ )	1.09 (54.9 $\times 10^{-5}$ )	1.10 (53.4 $\times 10^{-5}$ )
91	1.80 (70.1 $\times 10^{-5}$ )	1.69 (65.0 $\times 10^{-5}$ )	1.47 (84.2 $\times 10^{-5}$ )	1.46 (84.9 $\times 10^{-5}$ )

注) ( ) 内は乾燥収縮ひずみ 供試体数3本の平均値

#### (5) クリープ

即時脱型を行なったコンクリートのクリープについて検討した結果はきわめて少ないので、ゼロスランプの超かた練りコンクリートを用い、スランプ数センチメートルの一般製品用コンクリートと比較してクリープ試験を行ない、蒸気養生の影響も調べた。

##### 1) 実験の概要

普通セメント (比重=3.15, 28日圧縮強さ=41.2 Kg/cm<sup>2</sup>)、最大寸法20mmの吉野川砂利、粗粒率が2.79の吉野川砂を用い、表-2.7.10に示す3種配合のコンクリートを使用した。

表 - 2. 7. 10 クリープ試験に用いたコンクリートの配合

コンクリートの種類	配合No.	最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m <sup>3</sup> )			
						W	C	S	G
即時脱型用	I	20	0	27.5	4.0	110	400	779	1160
	II	20	0	36.7	4.5	110	300	914	1113
一般製品用	III	20	5	42.7	4.3	171	400	770	1015

注) コンクリートの成形温度 28~29°C

塩化ビニールホースで包んだ直径19mmの鉄筋の両端に木製の平板を取り付け、15×15×5.4cm

の内寸法の即時脱型用型わくの中に固定し、強制練りミキサで練り混ぜたコンクリートを盛り込み、振動数 10800 vpm、振動時間 90 秒の条件で締固め成形したのち、ただちに型わくを反転して即時脱型を行なった。即時脱型後、蒸気養生を行なうものは、前養生+温度上昇+等温養生+冷却期間 = 2 + 2.5 + 2 (70 °C) + 2.5 時間の条件で養生そうに入れて養生し、蒸気養生を行なわないものは供試体を作成後ただちに 20 °C 恒温室に移した。なお、スランブ 5 cm のコンクリートは、ワッカー振動台に取り付けて締固め成形したのち型わく養生とした。蒸気養生は配合 I と III の供試体について行なった。翌日より持続荷重を加える材令 14 日まで標準養生を行なった。また、同じ寸法の乾燥収縮試験用供試体も作成し、クリープ試験用のものと全く同一の条件で養生を行なった。供試体数は各配合、各養生条件についてそれぞれ 2 本とした。また、載荷時の圧縮強度を調べるため、 $15 \times 15 \times 5.4$  cm のはり供試体を作成し、同じ条件で養生し、材令 14 日で、 $15 \times 15 \times 15$  cm 立方形に切断して強度試験を実施した。

材令 14 日で水中より供試体を取り出し、クリープ試験用供試体の中央にセットしておいた鉄筋を引抜き、直径 17.6 mm の PC 鋼棒 (住友電工 KKK 製 SBPC125、引張強度 =  $138.8 \text{ Kg/mm}^2$ 、降伏点強度 =  $121.2 \text{ Kg/mm}^2$ ) を中央に入れ、両端に加圧板 ( $150 \times 150 \text{ mm}$ 、厚さ 15 mm) をセットしナットで止めて、緊張用のセンターホールジャッキを用いてプレストレスの導入を行なった。なお、コンクリートに加える持続応力は圧縮強度の 18% の値とした。なお、鋼棒の再緊張は、1, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 42 および 56 日の各材令で行なった。コンクリートのひずみ測定には、供試体の相対する側面に、コンタクトゲージ用のボールを打込んだ鉄片を 30 cm の間隔でそれぞれ 2 カ所はり付け、コンタクトゲージを用いて測定を行なった。クリープ試験用供試体で求めた全ひずみより乾燥収縮ひずみを引いてクリープひずみを求めた。

## 2) 実験結果とその考察

即時脱型を行なった超かた練りコンクリートおよび一般製品用コンクリートについて材令 91 日までのクリープおよび乾燥収縮ひずみの測定結果を図-2.7.6 に示す。試験開始時の圧縮強度が配合と養生条件によつてことなるので表-2.7.1 に、載荷応力を多少かえたが、載荷時の弾性ひずみに大差なくほぼ良好な結果がえられている。

図-2.7.6 超かた練りおよび一般製品用コンクリートのクリープひずみと乾燥収縮ひずみの測定結果

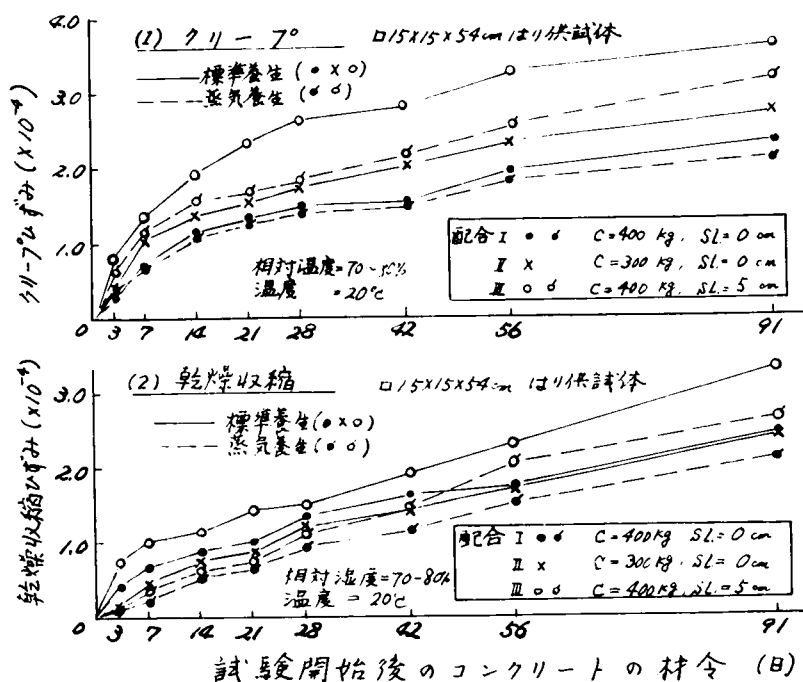




表 - 2. 7. 11 各種コンクリートの強度、クリープひずみの実験式およびクリープ係数

コンクリートの種類			養生条件	材令14日 圧縮強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )	載荷応力 (Kg/cm <sup>2</sup> )	弾性ひずみ (×10 <sup>-4</sup> )	クリープひずみ実験式 $f_t = \frac{t}{A+Bt} (\times 10^{-4})$	終極値 (×10 <sup>-4</sup> )	クリープ係数 $\phi$
配合No.	セメント量 (Kg)	スランブ (cm)							
I	400	0	標準養生	410	78	2.10	$t/8.95+0.343t$	2.92	1.39
I	400	0	蒸気養生	496	90	2.18	$t/7.54+0.418t$	2.39	1.10
II	300	0	標準養生	438	83	2.07	$t/6.09+0.305t$	3.28	1.58
III	400	5	標準養生	405	78	2.27	$t/3.50+0.243t$	4.12	1.82
III	400	5	蒸気養生	337	67	2.13	$t/5.52+0.276t$	3.62	1.70

図 - 2. 7. 6 にみられるように超かた練りコンクリートのクリープは一般製品用に比べて相当小さく、材令 9 1 日の実測値で蒸気養生を行なった場合 3 4 %、標準養生では 3 5 % 低減されており、表 - 2. 7. 11 のクリープ係数で比較してもそれぞれ、3 5 % および 2 4 % 小となっている。また、蒸気養生と標準養生とのクリープひずみを比較すると Shideler らの<sup>221)</sup>研究結果より多少小さいが、超かた練りで 1 0 %、一般製品用で 1 2 % の低減となっている。これは、供試体寸法や養生条件の差異も影響していると思われる。なお、クリープ係数では、それぞれ 7 % と 2 1 % の低減を示している。

つぎに、超かた練りコンクリートで単位セメント量を 3 0 0 Kg とした配合では、4 0 0 Kg の配合に比べてクリープひずみがやや大となっており、超かた練りの配合でも一般のコンクリートに<sup>420)</sup>いわれているように、富配合で水セメント比の小さいほうがクリープは小さくなる傾向がえられる。なお、木村らの<sup>135)</sup>超かた練りコンクリートのクリープひずみ測定結果でも、相対湿度 8 0 % 以上で湿空養生した場合、終極クリープ  $2.49 \times 10^{-4}$  および  $3.12 \times 10^{-4}$  (クリープ係数 0.8 および 1.1)、相対湿度 4 5 ± 3 % で乾燥養生した場合  $3.22 \times 10^{-4}$  および  $4.40 \times 10^{-4}$  (1.1 および 1.5) の値がえられており、また富配合ではクリープが小となっており、即時脱型を行なったコンクリートで測定した本実験結果と大差ない値となっている。

また、 $\square 15 \times 15 \times 54$  cm はり供試体で求めたコンクリートの乾燥収縮は、前節で述べたものより供試体寸法が大きく、養生室の相対湿度が高いので、乾燥収縮の値はかなり小さいがほぼ同様の傾向がえられており、蒸気養生による乾燥収縮の低下は 1 5 ~ 2 0 % となっている。

結局、即時脱型を行なった超かた練りコンクリートのクリープは、一般製品用コンクリートに比べて 2 4 ~ 3 5 % 程度小さく、また、蒸気養生を行なうと標準養生に比べて低減される。

また、クリープひずみは、富配合で水セメント比の小さいコンクリートほど小となる傾向がある。

#### (6) 水 密 性

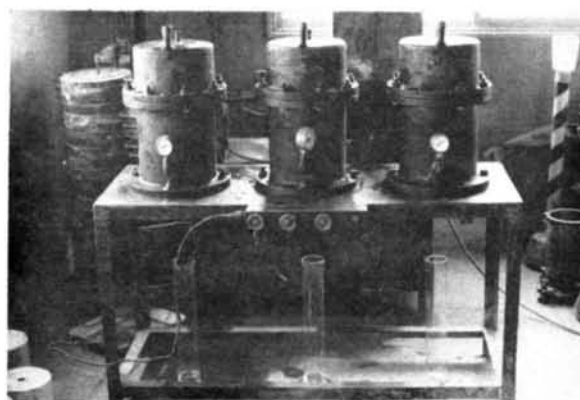
##### 1) 実験の概要

パサパサ状態の超かた練りコンクリートを用いた場合、締固めが不十分だとコンクリートがポーラスになりやすいと考えられる。一般に、土木用製品では水密性を要求するものが多く、とくに河海構造物に即時脱型製品を用いる場合に問題点となるので、超かた練りコンクリートの水密性についても十分に究明しておかなければならない。

したがって、KK丸東製作所製の外圧式透水試験装置(写真 - 2. 7. 2 参照)を用いて透水試験を行なった。この装置は、荷重式蓄圧装置による定水压機構を備えたもので、供試体は  $\phi 15 \times 30$  cm の円柱の中心に直径 2 cm の孔をもった中空厚肉円柱形のものをを用いた。

超かた練りコンクリートは表 - 2. 7. 5 に示したゼロスランブの配合 I および配合 II の 2 種と、比較のために目標スランブ 5 cm の一般製品用コンクリート ( $W/C=62.7\%$ ,  $s/a=50\%$ ,  $C=$

写真 - 2. 7. 2 実験に用いた外圧式透水試験装置



300 Kg、 $W = 182 \text{ Kg}$ 、実測スランプ = 5 cm) の計 3 種を用い、透水試験用供試体成形型わくをワッカー振動台に取り付け、振動数 10800 vpm、加速度約 20 g で 60 秒間締固め成形したのち、型わくのまま  $1 + 2.5 (20 \text{ deg/h}) + 2 (70^\circ\text{C}) + 2 \text{ h}$  の条件で蒸気養生を行なった供試体と蒸気養生を行なわないで  $20^\circ\text{C}$  の恒温室に移し標準養生したものも作成した。なお、富配合 (配合 II) では、標準養生のみとした。型わくは翌日取りはずし、すべての供試体は、以後材令 70 日まで水中養生を行なった。

所定材令になった供試体は、水中より取り出し、その側面および中空の内面をワイヤブラシでこすり、上、下面にパッキンをあてて透水試験装置に取りつけ、試験水圧  $28 \text{ Kg/cm}^2$  で透水試験を行ない、1 時間ごとの流出量を 3 ~ 4 時間にわたり、ほぼ一定となるまで測定し、次式により透水係数を求めた。<sup>309)</sup>

$$K = \frac{\mu}{\mu_{20}} \cdot \frac{\rho \log e^{r_o/r_i}}{2\pi h} \cdot \frac{Q}{P_o - P_i} \dots\dots\dots (2.7.2)$$

- ここに K : コンクリート供試体の透水係数 (cm / sec )  
 $P_o$  : 供試体の外側における水圧 (Kg/cm<sup>2</sup>)  
 $P_i$  : 供試体の内側における水圧 (Kg/cm<sup>2</sup>)  
 $Q$  : 流出量 (cc / sec )  
 $\rho$  : 水の単位容積重量 (g/cc)  
 $h$  : 供試体の高さ (cm)  
 $r_o$  : 供試体の半径 (cm)  
 $r$  : 供試体の中心孔の半径 (cm)  
 $\mu$  : 試験時温度における水の粘性係数 (g/cm · sec )  
 $\mu_{20}$  :  $20^\circ\text{C}$  における水の粘性係数 (g/cm · sec )

## 2) 実験結果とその考察

透水試験結果を示した表 - 2. 7. 12 にみられるように、超かた練りコンクリートの透水係数が一般製品用の値より小となっている。一般にブロックの場合のように単位セメント量 220 ~ 250 Kg の配合では、コンクリートが非常にポーラスになって水密性は劣ると思われるが、超かた練りでも単位セメント量を一般製品用と同程度にし、単位水量を考慮して強力な締固め成形を行なうと十分に密実な、一般製品用に劣らない水密性をもったコンクリートがえられる

表-2.7.12 製品用コンクリートの透水試験結果

コンクリート	単位セメント量 (Kg)	スラップ (cm)	養生条件	平均流出量Q(cc/sec)	透水係数K(cm/sec)
超かた練り	300	0	蒸気養生	0.00062	$1.8 \times 10^{-8}$
			標準養生	0.00095	$2.7 \times 10^{-8}$
一般製品用	400	0	標準養生	0.00024	$6.9 \times 10^{-8}$
			蒸気養生	0.00227	$6.6 \times 10^{-8}$
	300	5	蒸気養生	0.00227	$6.6 \times 10^{-8}$
			標準養生	0.00264	$7.6 \times 10^{-8}$

注) 材令70日、試験水圧28Kg/cm<sup>2</sup>

供試体数原則として2本

ことを示している。とくに単位セメント量の多い富配合コンクリートにすると水密性が改善される。なお、即時脱型を行なった場合の水密性に対する影響についてさらに検討する必要があると考える。

標準養生と蒸気養生との結果を比較すると、表-2.7.12のように、標準養生に比べて蒸気養生したコンクリートのほうが透水係数は小さくなる傾向があるが、これは蒸気養生直後透水試験時の材令70日<sup>235)</sup>までずっと湿潤養生を続けたためと思われる。Higginsonは蒸気養生後十分に湿潤養生を継続すれば、標準養生の結果と大差がないと報告している。

蒸気養生の際の養生条件、蒸気養生後の養生期間、超かた練りコンクリートで貧配合になった場合、などの水密性におよぼす影響についてはさらに研究を進める必要があると思われる。

結局、超かた練りのパサパサ状態のコンクリートを用いても、セメント量のある程度多く使用し、強力な振動締固め成形を行なえば、水密性のよいコンクリートをつくることが可能である。

#### (7) ま と め

蒸気養生した超かた練りコンクリートの曲げ強度、引張強度、動弾性係数、乾燥収縮、クリープ、水密性などの諸性質について、標準養生の場合と比較して検討した結果をまとめると、

- 1) 標準養生28日強度に対する蒸気養生を行なった超かた練りコンクリートの相対曲げ強度や引張強度は、相対圧縮強度に比べて大きい。
- 2) 超かた練りコンクリートの動弾性係数と圧縮強度との関係は、成形方法、養生方法などの相違にかかわらず、使用骨材が同じなら、同一の指数式で示すことができる。
- 3) 超かた練りコンクリートの乾燥収縮は、スラップ数センチメートルの一般製品用コンクリートに比べて20～24%小さい。また、マチュリチー400℃・h前後で蒸気養生すると標準養生に比べて、乾燥収縮は15～20%低減され、即時脱型を行なったものは、型わく養生に比べてわずかに乾燥収縮が大きくなる傾向がある。
- 4) 即時脱型を行なったコンクリートのクリープは一般製品用コンクリートより24～35%小さく、また、蒸気養生を行なうと標準養生に比べて低減される。また、富配合で水セメント比の小さいコンクリートほどクリープは小となっている。
- 5) 超かた練りコンクリートでも、一般製品用と同程度のセメント量を用い、強力な締固め成形を行なえば、水密性のよいコンクリートがえられ、蒸気養生後十分に湿潤養生を行なえば、標準養生に劣らない水密性を示す。また、富配合にすると水密性をより改善することができる。

## § 5. 超かた練りコンクリートに対する混和材料の影響

### (1) ま え が き

近年、コンクリートのワーカビリティ、耐久性、その他の性質を改善するため、A E 剤、減水剤、ポゾランなど種類の混和材料が市販され、製品用コンクリートにも用いられる傾向のあることは第 1 編、第 4 章および本編、第 3 章で指摘し、かた練りコンクリートを対象に検討した。

超かた練りコンクリートはパサパサ状態であるから、混和材料を用いることによって成形施工性を改善し、締固め効果や充てん率をあげ、その品質を向上することができれば、きわめて好都合である。しかし、超かた練りコンクリートに対する混和材料の使用方法については、まだ十分に研究が進められていない現状である。

したがって、ゼロスランプで単位セメント量 300 Kg の主として碎石コンクリートに数種の代表的な混和材料を用い、蒸気養生、加圧養生、即時脱型などを行ない、圧縮強度、曲げ強度などを調べ、超かた練りコンクリートに対する混和材料の効果について検討を行なった。<sup>421)</sup>

### (2) 実験の概要

#### 1) 使用材料とコンクリートの配合

セメントは普通セメント（比重 = 3.15，ブレン比表面積 =  $3260 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，28 日圧縮強度 =  $41.4 \text{ Kg/cm}^2$ ）を用い、骨材は表 - 2.7.1 に示した最大寸法 20 mm の鳴門市産の碎石と吉野川産の川砂のほか、粗骨材として吉野川産の砂利（最大寸法 = 20 mm，比重 = 2.61，吸水量 = 1.13%，空けき率 = 35.3%，粗粒率 = 6.51）も使用した。なお、細骨材は粗粒率が、2.81 になるよう粒度調整して用いた。

混和材料は市販の代表的なものの中より、超かた練りコンクリートの品質改善にある程度効果のあると考えられる表 - 2.7.13 に示す 7 種のものを実験に使用した。

表 - 2.7.13 実験に用いた混和材料

混和材料の種類	記号	空気連行性	使用量 (セメント重量に対し)	主成分
A E 剤	V	有	0.04%	松材から抽出した樹脂酸塩
減水剤	L	無	0.27%	有機高分子化合物および界面活性剤
減水剤	W	有	0.13%	アルキルベンゼンスルホン酸塩、ヤシ油脂脂肪酸ジエタノール
減水剤	P	無	0.30%	ポリオール複合体
促進剤	C	無	1%	塩化カルシウム
収縮低減材	G	無	5%代替	硬セッコウ、炭酸カルシウム（比重 = 2.80）
フライアッシュ	F	無	20%代替	シリカ（57.2%），アルミナ（比重 = 2.16）

実験に用いたコンクリートはすべてゼロスランプの超かた練りで、コンシステンシーは C F 値で測定し、目標 C F 値を 0.74 とし、0.72 ~ 0.76 の範囲に入るよう各種コンクリートの単位水量を決定した。示方配合を表 - 2.7.14 に示す。

#### 2) 供試体の作成と養生条件

強制練りミキサを用いて、モルタルで 1 分、粗骨材を投入してさらに 1 分 30 秒練りまぜを行なったのち、C F 値と空気量を実測し、つぎの 3 つの実験シリーズにわけて供試体を作成し、蒸気養生あるいは加圧養生を行なった。

##### i) 蒸気養生に対する混和材料の効果調べる実験

φ10×20 cm の円柱形型わくをリッカー振動台（p. 29 参照）に取り付け、振動数 10800 vpm、振動時間 60 秒の条件で締固め成形し、型わくのまま表 - 2.7.15 に示す蒸気養生条

表 - 2. 7. 1 4 使用コンクリートの示方配合

使用 骨材	配合 No	最大 寸法 (mm)	スランブ (cm)	目 標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)		G (kg)			混和材 料使用 量	実 験 値	
									5~12 mm	12以下 mm	20~15 mm	15~10 mm	10~5 mm		CF値	空気量 (%)
川砂利 (R)	R-Pl	20	0	-	400	52	120	300	306	715	238	333	381	-	0.76	2.5
	R-L	20	0	-	350	47	105	300	270	651	261	365	418	800cc	0.77	1.4
	R-W	20	0	4.5	33.3	47	100	300	282	659	264	375	423	400cc	0.72	5.0
砕 石 (C)	C-Pl	20	0	-	450	55	135	300	322	752	218	305	349	-	0.75	2.7
	C-L	20	0	-	41.7	50	125	300	293	683	242	339	388	800cc	0.76	1.8
	C-W	20	0	4.5	37.7	50	113	300	293	684	243	340	389	400cc	0.73	5.5
	C-P	20	0	-	37.7	50	125	300	289	674	239	335	382	900cc	0.74	1.9
	C-V	20	0	4.5	40.0	50	120	300	291	678	241	337	385	1200cc	0.74	2.7
	C-F	20	0	-	41.7	53	125	240	311	725	228	319	365	60kg	0.72	1.3
	C-Ca	20	0	-	44.3	55	133	300	323	753	219	306	350	3kg	0.76	2.0
	C-G	20	0	-	43.7	54	131	285	318	742	224	314	358	15kg	0.74	2.1

件を用いて養生したのち、20℃の恒温室に移して翌日脱型し、以後20℃の水中で所定材令まで養生した。なお、比較のため蒸気養生を行なわない標準養生供試体も作成した。

② 即時脱型に対する混和材料の影響を調べる実験

□15×15×54cmのはり供試体の作成できる即時脱型型わく( p. 参照)を用い、ワッカーバイブレーターを取り付け前述と同じ条件で締め固めたのち、ただちに即時脱型し、表-2.7.15の蒸気養生条件で養生し、材令1日以後は所定材令まで20℃水中養生を行なった。

③ 加圧養生に対する混和材料の影響を調べる実験

加圧成形を行ないその圧力を保持したまま加圧養生を行なう供試体は、加圧成形型わく( p. 参照)を用い、φ10×20cmの円柱形型わくにコンクリートを一層に詰め、前述の条件で振動台で締め固めを行なったのち、圧力保持用の外部型わくに取り付け、圧縮試験機を用いて加圧力15kg/cm<sup>2</sup>、加圧時間3分の条件で加圧し、ボルトを締めつけて圧力を保持したまま、ただちに養生そうに入れ、表-2.7.15に示す加圧養生条件で養生を行なった。翌日脱型して所定材令まで20℃水中で養生した。

表 - 2. 7. 1 5 蒸気養生および加圧養生条件

養生条件	前養生期間 20℃(h)	温度上昇期間 (h)	最高温度 (℃)	等温養生期間 (h)	冷却期間 (h)	全養生期間 (h)	マチュリチー (℃・h)
蒸気養生	3	2.5	70	2	2.5	10	480
加圧養生	0	0	95	3	0	3	290

3) 材令と強度試験

材令28日で水切り後、φ10×20cmの円柱供試体は圧縮強度を試験し、即時脱型したは

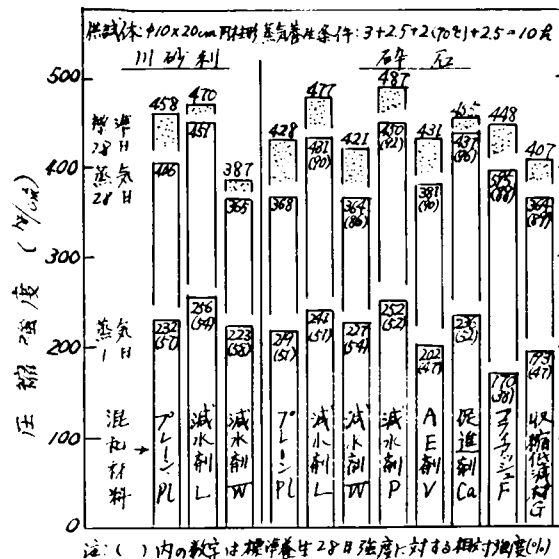
り供試体については曲げ強度と折片圧縮強度を求めた。なお、蒸気養生、加圧養生を行なった円柱供試体では材令1日の圧縮強度も試験した。

### (3) 実験結果とその考察

#### 1) 蒸気養生したコンクリートに対する混和材料の影響

各種混和材料を用いた超かた練りコンクリートおよび混和材料を用いないプレーンコンクリートを蒸気養生し、材令1日および28日で圧縮強度を求めた結果を、標準養生28日強度と比較して図-2.7.7に示す。この結果にみられるように、減水剤LとPおよび促進剤を用いたコンクリートは、材令1日および28日ともプレーンコンクリートより高強度がえられている。とくに、蒸気養生を行なったこれらのコンクリートでは、材令1日で8～15%、28日では13～22%プレーンより強度が高く、同一の配合強度では単位セメント量のある程度、節約できることを示している。なお、材令1日の相対強度は51～54%、材令28日では90～96%で、蒸気養生を行なう超かた練りコンクリートに対し効果的な混和剤といえる。塩化カルシウムはセメント量に対し1%加えたが、同様に蒸気養生効果が大きく、鉄筋の腐食される心

図-2.7.7 蒸気養生した超かた練りコンクリートの圧縮強度におよぼす混和材料の影響



配のない無筋コンクリート製品に用いるのがよい。

なお、減水剤Wを用いたコンクリートは、碎石ではプレーンコンクリートと大差なく、他の空気を連行しない減水剤の場合ほど高強度はえられなかったが、空気連行能力が大きく超かた練りでも5～5.5%の空気量が含まれるので、強度より凍害抵抗性を重視する製品に使用するのが適していると思われる。また、超かた練りにAE剤を用いると表-2.7.14に示したように空気が連行されにくいので、強度はプレーンコンクリートと同程度である。目標の空気量を連行するためのAE剤の使用量や適当なAE剤についてはさらに検討する必要があると思われる。

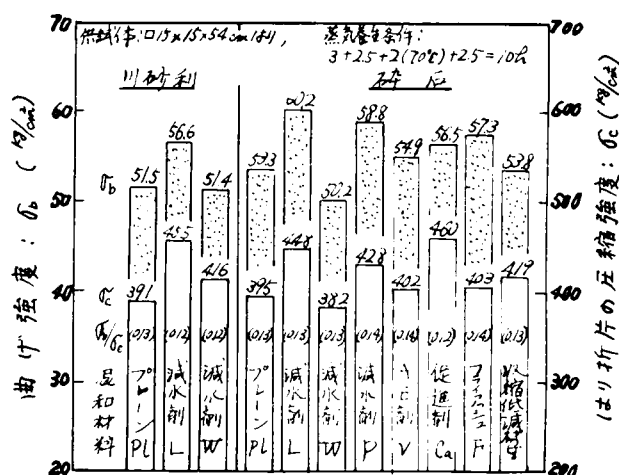
フライアッシュを20%セメントに代替したコンクリートは他のコンクリートに比べて、脱型時の1日強度がかなり低く、初期強度を高めるためには第3章で述べたように蒸気養生の際のマチュリチーを大きくする必要があると思われるが、材令1日から28日への強度の増進率はもっとも顕著である。収縮低減材Gを用いた場合は、プレーンコンクリートより初期強度がかなり低い、乾燥収縮低減によるひびわれ防止の面からスラブなどの製品に、とくに外割で

加えるとある程度有効であると思われる。

## 2) 即時脱型を行なったコンクリートに対する混和材料の影響

各種混和材料を用いたコンクリートを即時脱型したのち蒸気養生し、材令28日で曲げ強度および折片の圧縮強度を求め、即時脱型を行なったコンクリートに対する混和材料の影響を調べた結果を図-2.7.8に示す。

図-2.7.8 即時脱型したコンクリートの強度におよぼす各種混和材料の影響



### i) 曲げ強度について

空気を連行しない減水剤 L と P、促進剤、フライアッシュなどを用いたコンクリートの曲げ強度はブレンコンクリートに比べて6~13%高くなっており、とくに減水剤の使用が曲げ強度の向上に効果的である。AE剤、収縮低減剤などを用いたコンクリートの曲げ強度はブレンコンクリートと大差ない。空気を連行するタイプの減水剤いわゆる AE 減水剤 W を用いたコンクリートは、前述したように超かた練りでも空気連行性のよいため、ブレンと同程度か砕石コンクリートではやや低目の値を示している。

### ii) 圧縮強度について

はり折片の圧縮強度に対する各種混和材料の影響は、図-2.7.6に示した円柱供試体の型わく養生の材令28日の結果の傾向とはほぼ同様であり、減水剤 L と P、促進剤などを用いたものがブレンコンクリートに比べて8~17%強度が高くなっている。しかし、この割合は型わく養生に比べるとやや小さい。

図-2.7.7に示したように、圧縮強度の高いものが曲げ強度も高くなる傾向が認められるが、促進剤を用いたコンクリートは圧縮強度の低い割に曲げ強度が大となっており、逆にフライアッシュを用いたものは圧縮強度の低い割に曲げ強度は高くなっている。したがって、曲げ圧縮比 ( $\sigma_b/\sigma_c$ ) はコンクリートの種類によって多少ことなり、0.12~0.14の範囲となっている。

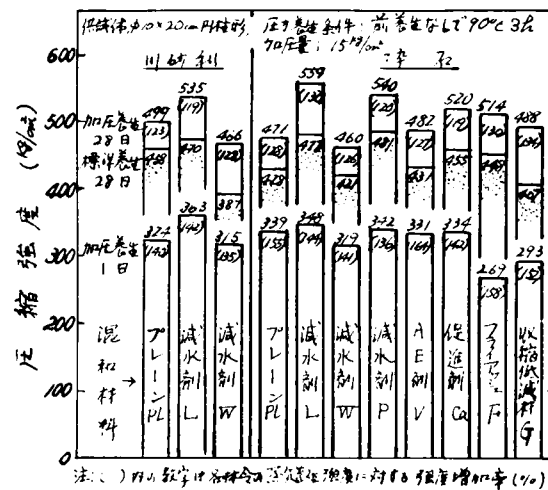
なお、即時脱型した供試コンクリートブロックの重量をはかると、減水剤 L を用いたものがもっとも重く、詰り具合のよいことを示しており、即時脱型したコンクリートのはだ面ももっとも良好である。減水剤 P も比較的良好であり、空気を連行しない減水剤がはだ面の改善に効果的である。

## 3) 加圧養生したコンクリートに対する混和材料の影響

図-2.7.9は各種混和材料を用いた超かた練りコンクリートを加圧養生し、材令1日および

28日の圧縮強度を求めた結果を、標準養生28日の値と比較して示したものである。加圧養生した場合も、減水剤LとPおよび促進剤を用いたコンクリートがブレンに比べて高く、そ

図-2.7.9 加圧養生したコンクリートの圧縮強度におよぼす混和材料の影響



の割合は材令28日で7～19%となっている。加圧養生を行なったコンクリートの材令28日の強度は、標準養生に比べて高く、加圧養生は超かた練りコンクリートの養生期間を短縮し、強度を改善するのにきわめて効果的であることを示している。

とくに、加圧養生は初期強度の発現に有利であり、加圧しないで蒸気養生したものに比べ、材令1日で66～129  $\text{Kg/cm}^2$ 、増加率では40～64%、平均64%の強度増加がえられている。材令28日では強度増加率は減少し17～34%、平均26%となっている。加圧の効果は、混和材料の種類によっていくぶんことなり、材令28日では収縮低減材を用いたコンクリートがもっとも大であったが、平均的にはブレンコンクリートと大差ない結果を示している。なお、フライアッシュを用いたコンクリートの加圧養生による強度は材令1日ではもっとも低い<sup>413)</sup>が長期材令への強度の伸びがよく、材令28日ではブレンコンクリートより大となっている。因分<sup>413)</sup>も、加圧養生にフライアッシュを用いて好結果がえられたと報告しており、良品質のフライアッシュの使用は効果的であるといえる。

#### 4) 各種混和材料を用いたコンクリートのブレンコンクリートに対する強度比

前述したコンクリートの成形方法、養生方法、材令別にブレンコンクリートの強度(=100)に対する各種混和材料を用いたコンクリートの強度比を一括して示すと表-2.7.16のとおりである。

これらの結果より、超かた練り用の混和材料としては、空気を連行しない減水剤の使用がもっとも効果的であり、無筋コンクリート製品では促進剤の使用も有利であることがわかる。

蒸気養生を終ってから後養生され、湿潤状態で使用される製品では良質のフライアッシュの使用も有効と思われる。

#### (4) ま と め

超かた練りコンクリートの強度におよぼす各種混和材料の影響を検討した結果をまとめると、

- 1) 空気連行性のない減水剤や促進剤の使用が超かた練りコンクリートの強度改善に効果的であり、即時脱型を行なった場合でも充てん率がよく有利な結果がえられる。
- 2) 加圧養生を行なうと、蒸気養生に比べ材令1日で平均46%、28日で26%程度の強度増加がえられ、材令28日では空気を連行しない減水剤、促進剤、フライアッシュなどを用いたものが高い強度を示している。



表 - 2. 7. 1 6 各種混和材料を用いたコンクリートとブレンコンクリートとの強度比

供試体寸法	成形方法	養生方法	材料	測定法	普通コンクリート			ブレンコンクリート							
					強度比の平均値			強度比の平均値							
					PZ	L	W	PZ	L	W	P	AES	Ca	F	G
φ10×20cm	型わく	標準養生	28日	圧縮	1	1.05	0.95	1.0	1.11	0.9	1.11	1.1	1.1	1.1	1.1
		乾燥養生	1	圧縮	1.0	1.10	0.9	1.1	1.10	1.04	1.11	1.2	1.1	1.0	0.9
		乾燥養生	28日	圧縮	1.0	1.15	0.9	1.0	1.1	0.9	1.22	1.4	1.1	1.0	0.9
15×15×54cm	型わく	標準養生	28日	曲げ	1.0	1.10	1.0	1.0	1.15	0.9	1.1	1.3	1.1	1.1	1.1
		乾燥養生	28日	曲げ	1.0	1.16	1.0	1.0	1.15	0.9	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1
φ10×20cm	型わく	標準養生	1	圧縮	1.0	1.12	0.9	1.0	1.15	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9
		乾燥養生	28日	圧縮	1.0	1.12	0.9	1.0	1.1	0.9	1.1	1.2	1.1	1.1	1.0
		強度比の平均値					1.0	1.13	0.9	1.0	1.12	0.9	1.12	1.1	1.1

## § 6. 即時脱型用コンクリートの適正配合

### (1) まえがき

即時脱型方式を用いたコンクリート製品では、型わくをはずしたのちコンクリートが変形したり、くずれたりすることがないように湿った土のようなコンクリートを用いている。単位水量が多いと成形は容易になるが変形、たわみなどを生ずるし、逆に水量が少なすぎると締固めが十分に行なえず、コンクリート中に空けきを残し、また、はだ面も悪化するので、その適正配合の選定は即時脱型製品にとってきわめて重要な問題である。

従来より即時脱型に関して発表された研究結果はきわめて少なく、石橋らの<sup>422)</sup>ブロックマシンに関する報告、山本ら、<sup>133)</sup>阪本などの土木用ブロックの配合に関する研究、田中の<sup>423)</sup>まくらぎの即時脱型に関する報告などがあるに過ぎない。これは、製品の製造上の問題とも関係するし、製品工場で検討された場合にはデータが公表されない点にも原因があると思われる。今後、一般土木製品への即時脱型方式の利用を考えると、その適正配合や品質向上についてさらに研究を進める必要があると考える。

したがって、ここでは即時脱型に用いるコンクリートの配合に関して基礎的資料をえるため、強力な締固め成形の可能な即時脱型型わくを用いてコンクリート供試体を作成し、その品質とくに強度におよぼす単位水量、単位セメント量、細骨材率、骨材粒度、混和剤などの配合の影響を蒸気養生を行なわない場合について調べ、適正配合について検討した。<sup>424)</sup>

### (2) 実験の概要

#### 1) 使用材料とコンクリートの配合

普通セメント（比重＝3.15，28日圧縮強さ＝41.2 Kg/cm<sup>2</sup>）を用い、粗骨材は最大寸法20mmの大塚砕石および吉野川砂利、細骨材は吉野川砂を用いた。これらの骨材の品質は表-2.7.1および前節に述べたとおりである。粗骨材は20～15，15～10および10～5mmの3粒度区分、細骨材は5～1.2および1.2mm以下の2粒度区分にふるい分けて、表-2.7.17に示す標準粒度になるよう混合比を決めて使用した。とくに、骨材粒度の影響について検討す

る場合には、この標準粒度も含めて碎石については5種、川砂について3種、図-2.7.10のように粒度を変えたものも用いた。

表-2.7.17 使用骨材の標準粒度

骨材の種類		ふるいを通るものの重量百分率									粗粒率 (FM)
		2.0mm	1.5mm	1.0mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	
粗骨材	碎石	100	84	43	4	0	0	0	0	0	6.53
	川砂利	100	88	40	2	0	0	0	0	0	6.58
細骨材	川砂	100	100	100	100	92	73	44	9	1	2.81

図-2.7.10 粒度の影響を検討した骨材の粒度曲線

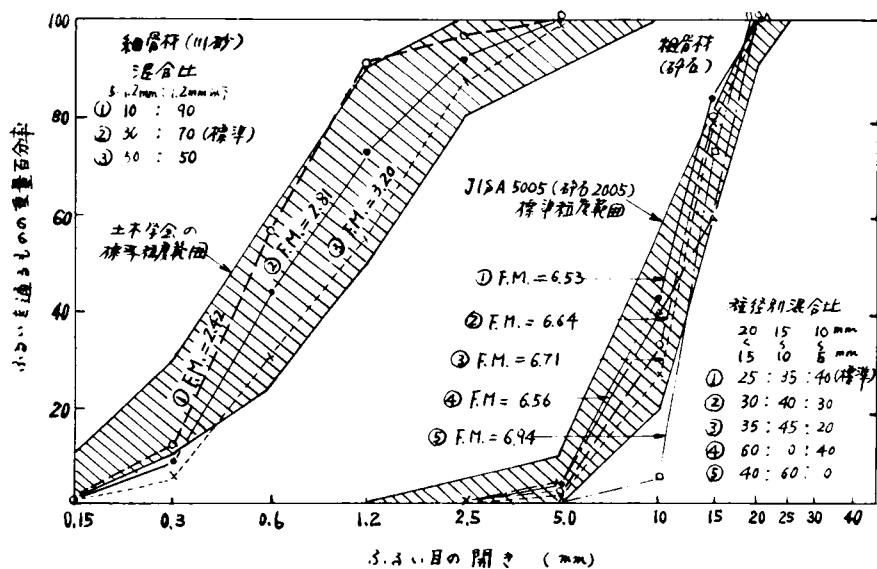


表-2.7.18 即時脱型に用いたコンクリートの配合

実験シリーズ	粗骨材の種類	単位水量 (kg)	単位セメント量 (kg)	細骨材率 (%)	混和剤 (cc)
単位水量	碎石*	103, 111, 119, 127, 135,	300	48	—
	川砂利*	96, 104, 112, 120, 128,	300	45	—
単位セメント量	碎石	127	200, 250, 300, 350, 400,	54, 51, 48, 45, 42,	—
	川砂利	112	200, 250, 300, 350, 400,	51, 48, 45, 42, 39,	—
細骨材率	碎石	127	300	35, 40, 45, 50, 55,	—
	川砂利	127	400	30, 35, 40, 45, 50,	—
	川砂利	112	300	35, 40, 45, 50, 55,	—
骨材の粒度***	碎石	127	300	48	—
	川砂利	112	300	45	—
混和剤	碎石	105, 115	300	43, 45	AE剤V 210 (2.9), 120 (3.0)**
	川砂利	100, 110	300	43, 45	減水剤W 480 (4.5), 300 (4.8)
	川砂利	115	300	45	減水剤L 800 (1.8)

(注) \* 粗骨材の最大寸法 20mm, スランプ 0cm.

\*\* 実測空気量 (%).

\*\*\* 碎石, 川砂利について細骨材の粒度3種, 粗骨材については碎石のみについて粒度を5種に変えた。

実験は主としてブレンコンクリートについて行なったが、前節の実験に用いた混和剤の中から A E 剤 V、空気を連行する減水剤いわゆる A E 減水剤 W、減水剤 L の 3 種をとりあげ、A E 系のものについては使用量についても検討を行なった。使用したコンクリートはゼロスランプの超かた練りで、脱型後くずれたり、変形したりしない範囲内で、単位水量、単位セメント量、細骨材率、粒度、混和剤などをかえた表 - 2.7.18 に示す配合を用いた。なお、超かた練りの場合でも使用骨材によって同一コンシステンシー ( C F 値で測定 ) をえるに要する単位水量は多少ことなるので、碎石と川砂利コンクリートとでは、単位水量や細骨材率の範囲を多少変えた。

## 2) 即時脱型コンクリート供試体の作成と養生

コンクリートは 1 バッチ 50 ℓ とし、強制練りミキサを用いて、注水直後から 1 分間でモルタルを練り、ミキサを止めて粗骨材を投入したのち、さらに 1 分 30 秒練りまぜを行ない、まだ固まらないコンクリートのコンシステンシーは C F 試験および V B 試験によって測定した。また、空気室圧力方法を準用し、振動台で締め固めて、空気量も測定した。

即時脱型コンクリート供試体の作成には、本章第 3 節に述べた即時脱型用型わくを用い、振動数 10800 vpm、振動加速度約 15 g の条件で 60 秒間締め固めたのち反転して即時脱型を行なった。なお、比較のために  $\phi 10 \times 20$  cm の円柱形型わくを用い、ワッカー振動台で、即時脱型の場合と同じ振動数で締め固め、即時脱型を行なわない円柱供試体も作成した。

即時脱型したはり供試体、即時脱型しない円柱供試体は成形後ともにおおよそ 20 °C の養生室に移し、翌日 20 °C  $\pm$  2 deg の水そうに入れ、材令 28 日まで養生した。なお、供試体数は 1 種につき 3 本とした。

## 3) 硬化コンクリートの試験

即時脱型を行なったはり供試体は、材令 28 日で曲げ強度を試験したのち、その折片の圧縮強度試験を行なった。また、円柱供試体については、動弾性係数を求めたのち、圧縮強度試験に供した。また、はりおよび円柱供試体とも水中養生を行なう前に供試体重量と寸法をはかり、これより実測単位容積重量を求め、配合より決まるコンクリートの理論単位容積重量を用いて、コンクリートの充てん率を次式により求めた。

$$F = \frac{W_m}{W_t} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2.7.3)$$

ここに

{	F :	コンクリートの充てん率 (%)
	W <sub>m</sub> :	コンクリートの実測単位容積重量 (Kg/m <sup>3</sup> )
	W <sub>t</sub> :	コンクリートの理論単位容積重量 (Kg/m <sup>3</sup> )

なお、即時脱型製品ではコンクリートのはだ面も重要視されるので、即時脱型を行なったコンクリートについて観察し、配合の影響を考察した。

## (3) 実験結果とその考察

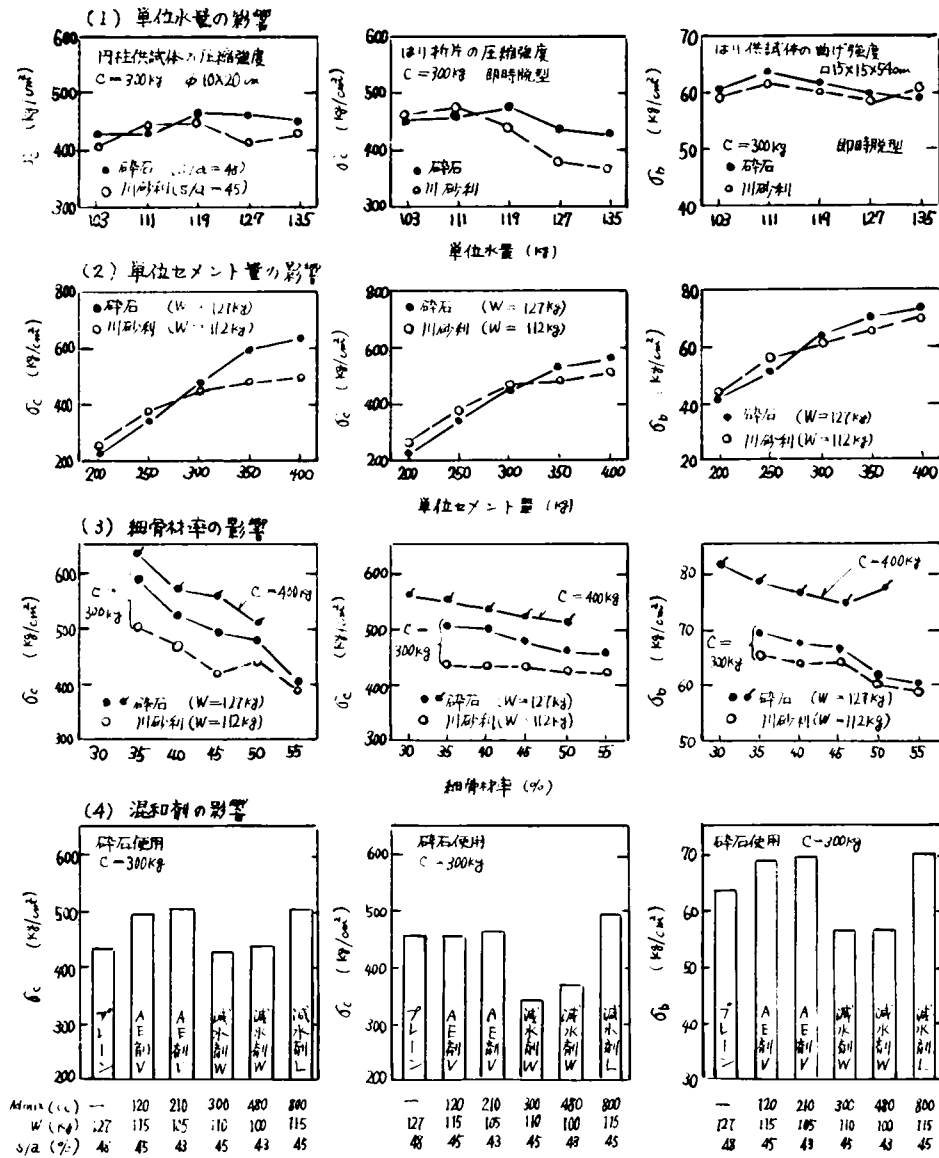
### 1) 即時脱型を行なったコンクリートの配合と強度

即時脱型を行なったコンクリートの材令 28 日の曲げ強度と圧縮強度におよぼす単位セメント量、単位水量、細骨材率、混和剤などの影響を、円柱供試体の圧縮強度試験結果とともに図 - 2.7.11 (1) ~ (4) に示す。

#### i) 単位水量の影響について

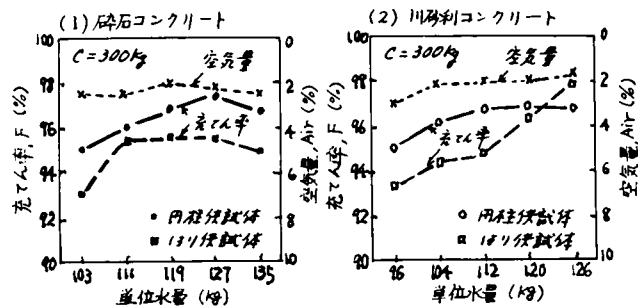
単位セメント量を一定とし、単位水量を変えた場合、図 - 2.7.11 (1) のように、川砂利および碎石コンクリートとも強度が最大になる最適単位水量が存在する。これは、ある程度単位水量の多いほうがセメントペースト量が増し、しかもその流動性がよくなり、締め固めの

図 - 2. 7. 1 1 コンクリートの配合と超かた練りコンクリートの強度



際の充てん性が改善されるため、図 - 2. 7. 1 2 にみられるように、即時脱型のできる範囲内で単位水量が多くなるほど充てん率は大きくなる傾向がある。したがって、この実験に用いた配合では、碎石コンクリートでは 1 1 0 ~ 1 2 5 Kg、川砂利コンクリートでは、1 0 5 ~

図 - 2. 7. 1 2 単位水量のことなるコンクリートの充てん率と空気量



120 Kgの範囲内で単位水量を選ぶのが適当と思われる。

## ii) 単位セメント量の影響について

同じ単位水量で、単位セメント量をかえると図-2.7.10(2)にみられるように、セメントの増量とともに明らかに強度は高くなるが、その増加率は富配合になるほど低下する。超かた練りコンクリートは水セメント比がきわめて小となるので、所要強度より配合を決める場合、単位セメント量が少なくてすむが、セメント量が少ないと充てん率が悪くポーラスになりやすく、はだ面が劣り、耐久性、水密性も低下するので、ブロック類以外の製品では少くとも単位セメント量300 Kg程度は使用するのが望ましい。田中は、貧配合をカバーするため増量材の使用を報告しているが、フライアッシュを外割りで加えるのが効果的と思われる。

## iii) 細骨材率の影響について

細骨材率を大きくすると強度は低下するが、これはパサパサ状態が顕著になって充てん率が悪くなるためである。逆に、細骨材率が小さすぎてもモルタルが不足して充てん率やはだ面が劣る傾向があるが、細骨材率が35～45%の範囲内であれば、強度に顕著な差はみられない。山本らは、細骨材率38%のとき空げき率が最小になるものが多いと述べている。

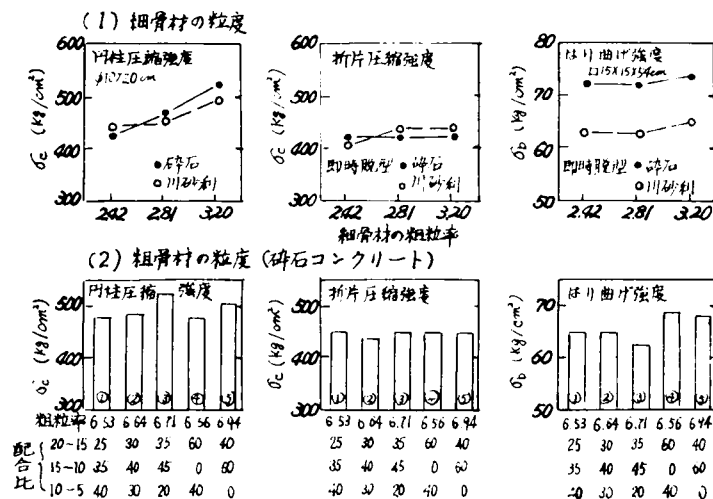
## iv) 混和剤の影響について

空気を連行しない良質の減水剤は、超かた練りコンクリートの強度改善に効果的であることを前節で報告したが、この減水剤のほか良質のAE剤を用いたコンクリートも比較的よい結果がえられている。AE減水剤を用いたものの強度はブレンコンクリートより低い、これは表-2.7.16に示したように連行空気量の多いためと思われる。なお、AE剤、AE減水剤の使用量をますと、同一CF値をえるための単位水量はいくぶん低減できるが、実測空気量はほとんど変わらず、強度も大差ない値を示している。したがって、超かた練りコンクリートではAE剤の増量による空気量の増加はあまり期待できないように思われる。

## v) 骨材粒度の影響について

骨材の粒度をかえた場合の超かた練りコンクリートの強度を図-2.7.13(1)(2)に示す。細骨材の粒度については、粗粒率の大きいあら目のほうが強度はやや高くなる傾向がある。

図-2.7.13 骨材の粒度が超かた練りコンクリートの強度におよぼす影響



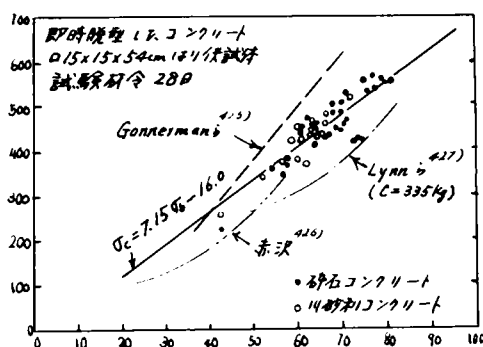
粗骨材の粒度については、超かた練りコンクリートでも不連続粒度がよいという報告があり、本実験結果でも曲げ強度は多少大となっている。しかし、はり折片の圧縮強度には差がみられず、さらに研究を行なう必要があると思われる。

なお、即時脱型を行なわない円柱供試体に対する配合、粒度などの影響は、即時脱型したコンクリートとほぼ同様であるが、はり折片の圧縮強度の場合より、粒度の影響が多少顕著に表われており、細骨材あるいは粗骨材があら目のほうが強度は高くなる傾向を示している。

## 2) 曲げ強度と圧縮強度との関係

即時脱型を行なったコンクリートについて材令 28 日の曲げ強度と圧縮強度との関係を示すと図-2.7.14 のようになり、曲げ圧縮比はおおよそ  $1/7$  であり、一般の構造用コンクリートについてえられている既往の研究結果と大差ない値となっている。

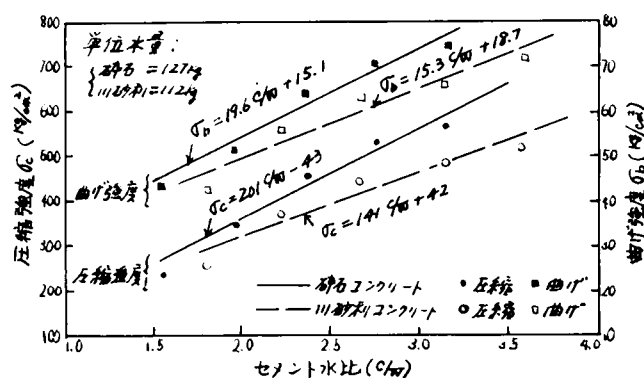
図-2.7.14 即時脱型を行なったコンクリートの曲げ強度と圧縮強度との関係



## 3) セメント水比と強度との関係

単位水量を一定とし、単位セメント量をかえて即時脱型したコンクリートの材令 28 日の曲げ強度と折片の圧縮強度とを求めたので、セメント水比を求めこれらの強度との関係を示すと、図-2.7.15 のとおりである。超かた練りコンクリートを用い即時脱型を行なった場合でも、

図-2.7.15 即時脱型を行なったコンクリートのセメント水比と強度との関係



十分な締め成形を行なえば、セメント水比説が適用でき、セメント水比と圧縮強度との関係を図-2.7.14 のような 1 次式で示することができる。

## 4) コンクリートの充てん率と強度について

山本<sup>133)</sup>らの報告によると、超かた練りコンクリートでは空げき率が 1% ますと圧縮強度は 6% 低下しており、Kaplan<sup>44)</sup> は一般のコンクリートで空げき率を 1% ますと圧縮強度は 5%、曲げ

強度は4%低下すると報告している。阪本も土木用ブロックの配合について検討し、充てん率と圧縮強度とは相当に高い相関関係があると述べている。

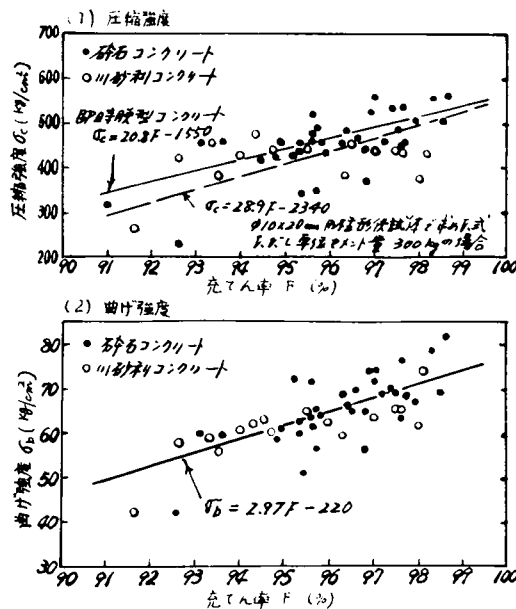
本実験の即時脱型を行なったコンクリートはり供試体について充てん率と曲げ強度および折片圧縮強度との関係を求めると図-2.7.16のようになり、両者の関係は次式で示される。

$$\begin{aligned}\sigma_c &= 20.8F - 1550 \\ \sigma_b &= 2.97F - 220\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (2.7.4)$$

ここに  $\left\{ \begin{array}{l} \sigma_c : \text{即時脱型したコンクリートはり折片の圧縮強度 (Kg/cm}^2\text{)} \\ \sigma_b : \text{即時脱型したコンクリートの曲げ強度 (Kg/cm}^2\text{)} \\ F : \text{コンクリートの充てん率 (\%)} \end{array} \right.$

すなわち、ばらつきはあるが充てん率1%の増加（空げき率では1%の低下）に対して曲げ強度、圧縮強度とも平均で5%程度増加している。また、即時脱型しない型わく養生の円柱供

図-2.7.16 即時脱型を行なったコンクリートの充てん率と強度との関係



試体では、平均6.2%とやや大きい増加率を示している。なお、同じ配合のコンクリートであれば、充てん率の大小は供試体の重量によって判断できるので、小型の製品であれば、その重さをはかって品質管理を行なうのもよい方法であると考えられる。

##### 5) 即時脱型を行なったコンクリートのはだ面

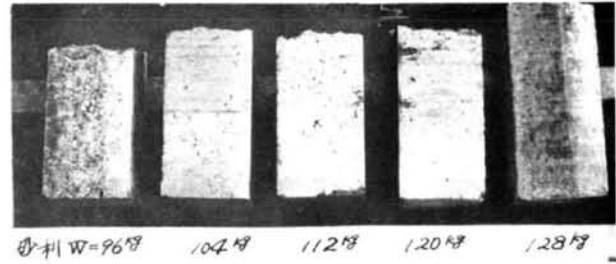
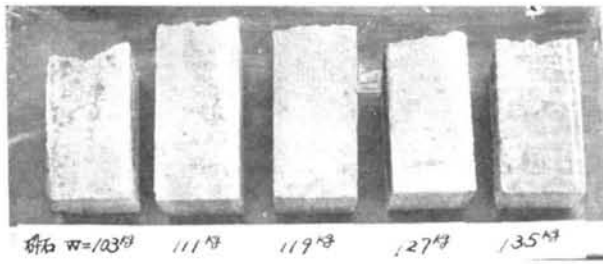
即時脱型製品においては、そのはだ面の良否は強度と同様に重要視されるので、即時脱型したコンクリートのはだ面におよぼす配合の影響を調査した。

まず写真-2.7.3(1)のように、単位水量はやや多目のほうが、はだ面はよくなる傾向がある。単位セメント量の少ない貧配合では、はだ面がざらざらし小さい気ほうが多いがセメントの増量とともに改善され、400Kg/m<sup>3</sup>の富配合では、粘調性が増すため表面に大きい気ほうの残る傾向がある（写真-2.7.3(2)参照）。

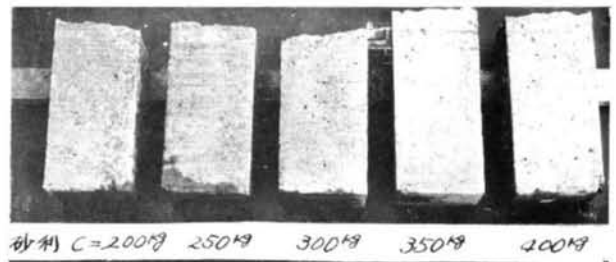
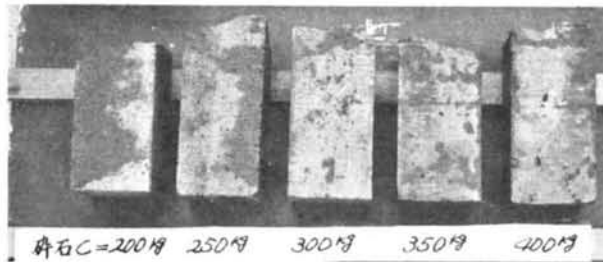
細骨材率を小さくするとモルタル量が少なくなるので、写真-2.7.3(3)のように空げきができやすいが、多すぎても充てん率が悪くなりのはだ面が劣るので、碎石および川砂利コンクリートとも40～45%程度が適当と考えられる。富配合コンクリートにすると細骨材率を5%低く

写真 - 2.7.3 即時脱型したコンクリートのはだ面の例

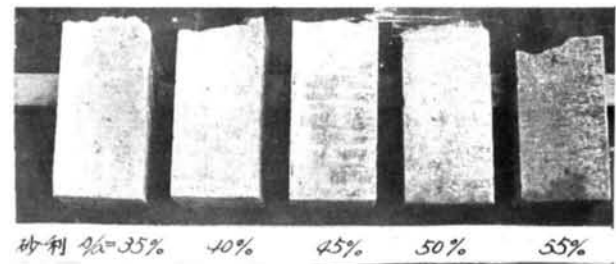
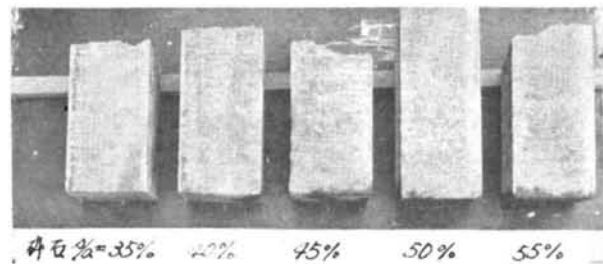
(1) 単位水量の影響 (碎石、川砂利コンクリート  $C = 300\text{Kg}$ )



(2) 単位セメント量の影響 (碎石コンクリート  $W=127\text{Kg}$ , 川砂利コンクリート  $W=112\text{Kg}$ )

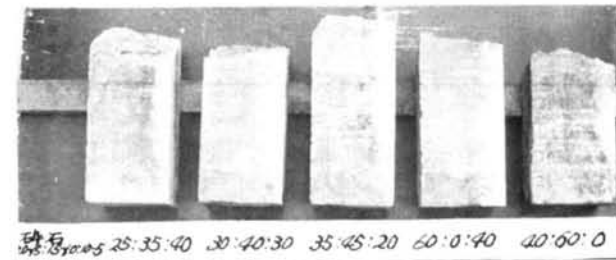
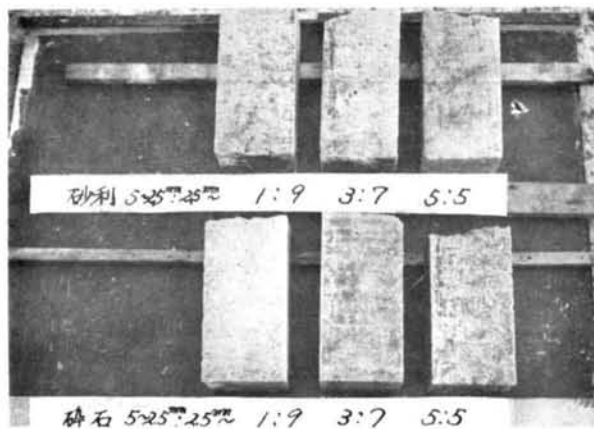


(3) 細骨材率の影響 (碎石,  $C=300\text{Kg}$ ,  $W=127\text{Kg}$ , 川砂利  $C=300\text{Kg}$ ,  $W=112\text{Kg}$ )

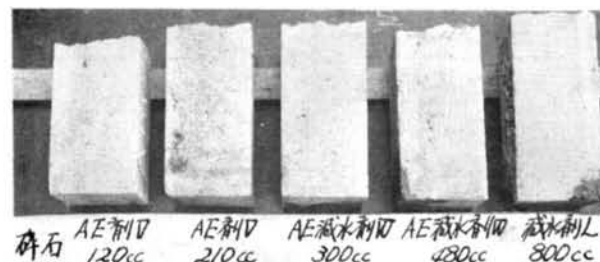


(4) 細骨材粒度の影響  
( $C=300\text{Kg}$ , 川砂利  $W=112\text{Kg}$ , 碎石  $W=127\text{Kg}$ )

(5) 粗骨材粒度の影響  
(碎石  $C=300\text{Kg}$ ,  $W=127\text{Kg}$ )



(6) 混和剤の影響 (碎石  $C=300\text{Kg}$ )

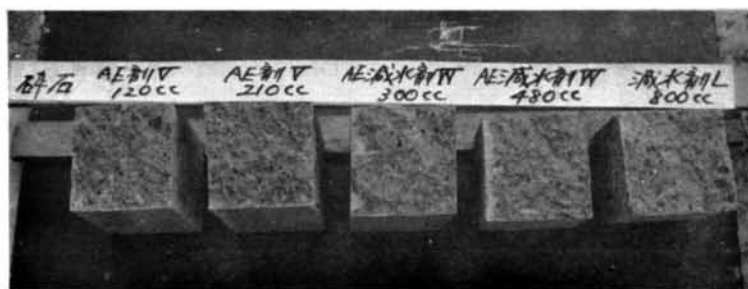




して35～40%としてもはだ面は良好である。また、骨材粒度については写真－2.7.3.(4)(5)のように顕著な差はみられない。

混和剤については、写真－2.7.3.(6)にみられるように空気を連行しない減水剤を用いたものがもっとも良好であり、はりの切断面でみられるように内部にも空げきが少ない(写真－2.7.4参照)。空気を連行する混和剤は型わく面や内部に気ほうが残る傾向がある。一般にコンクリートの充てん率がよいとはだ面もよくなる傾向がみられる。

写真－2.7.4 混和剤を用いた即時脱型コンクリートの切断面の一例(碎石使用、単位セメント量300Kgの場合)



#### 6) 即時脱型に用いる超かた練りコンクリートのコンシステンシー

即時脱型の際にくずれたり、変形したりしないためにはバサバサ状態のコンクリートを用いるが、同じゼロスランプのものでも、即時脱型に適したコンシステンシーあるいはワーカビリティをもっているかどうか測定する必要がある。すでに、第1編、第9章で超かた練りコンクリートのコンシステンシーについて、本実験のまだ固まらないコンクリートの試験結果をもとにして論じ、CF試験やVB試験によって、超かた練りコンクリートでも単位水量の多少によるコンシステンシーの相違をみることができるとを報告し、超かた練り用のVB装置はより強力な振動条件のものに改良する必要があることを指摘した。

本実験に用いたような締固め方法で成形し即時脱型を行なう場合の、最適CF値は、締固めの際のつまり具合、変形の有無、配合とはだ面、強度などとの関係もあわせ考えると、0.70～0.75の値が適当であると思われる。超かた練りコンクリートのコンシステンシーは、使用材料とくに粗骨材の粒形と最大寸法、混和剤の有無、細骨材率などの配合比によってことなるので、締固め係数試験を行ない、CF値が0.70～0.75になるよう単位水量を決定するのがよいといえる。

#### (4) 即時脱型用コンクリートの適正配合について

ブロック類以外に道路、河川、港湾、基礎などに用いる土木用製品を即時脱型方式によって製造する場合の配合を、十分な締固め成形を行なうことを条件に、前述した強度、充てん率、はだ面、コンシステンシーなどより総合して考えると、使用材料や製品の所要の品質によって多少こととなるが、最大寸法20mmで一般的な粒度の粗骨材であれば、表－2.7.19に示すような配合が適当であると思われる。

とくに、空気を連行しない良質の減水剤を用いると品質向上に効果的であり、同一CF値とするのに単位水量を約10Kg低減することができる。なお、超かた練りコンクリートは水セメント比がきわめて小さくなるので、 $\sigma - c/w$ 線よりセメント量を求めると、単位セメント量がきわめて少なくてもよいことになるが、土木用製品では耐久性、水密性などもきわめて重要であり、セメント量を多目にすると、密実なコンクリートがえられ、はだ面や水密性もよい結果がえられるので、ブロック類以外であれば、少なくとも単位セメント量を300Kg程度使用することが望まれる。

表 - 2.7.19 土木用即脱型製品の適正配合 (案)

骨材の種類	C F 値	単位水量 (Kg)	単位セメント量 (Kg)	細骨材率 (%)
砕 石	0.70~0.75	110~125	300~350	40~45
川 砂 利	0.70~0.75	105~120	300~350	40~45

\*最大寸法 20 mm, 標準粒度の骨材を使用

また、河海用、基礎用など湿潤状態で使用される製品では、セメントの1部を良質のフライアッシュで代替するのも、経済配合をえるためのよい方法と思われる。

(5) ま と め

超かた練りコンクリートの強度、充てん率、はだ面などにおよぼす単位水量、単位セメント量、細骨材率、混和剤、骨材粒度などの影響を調べ、即時脱型用コンクリートの適正配合について検討しに結果をまとめると、

- 1) 単位セメント量が一定のとき、即時脱型用コンクリートの強度はいくぶん単位水量を多目にしたほうが有利であり、細骨材率は低いほど、骨材粒度はあら目のほうが強度は高くなり、充てん率もよくなる傾向がある。
- 2) セメントの増量は、コンクリートの品質向上に効果的で、単位水量が一定なら即時脱型したコンクリートでもセメント水比説が適用できる。しかし、富配合になると粘稠性がきわめて大となり、表面仕上げが困難となる。
- 3) 即時脱型したコンクリートの曲げ強度と圧縮強度との比は、材令28日ではおよそ $1/7$ であり、一般構造用コンクリートの場合と大差ない。
- 4) 即時脱型したコンクリートの充てん率 (F ; %) と曲げ強度 ( $\sigma_b$  ; Kg/cm<sup>2</sup>) および折片圧縮強度 ( $\sigma_c$  ; Kg/cm<sup>2</sup>) との関係はつぎの1次式で示され、充てん率が1%増すと強度は約5%増加する。

$$\sigma_b = 2.97 F - 22.0$$

$$\sigma_c = 20.8 F - 155.0$$

- 5) 即時脱型したコンクリートのはだ面は、単位水量や単位セメント量は多目のほうが、細骨材率は40~45%程度のときによくなる傾向があり、とくに空気を連行しない減水剤の使用が効果的である。
- 6) 一般土木用製品を即時脱型方式によって製造する場合の適正配合は、使用材料や所要の品質によってことなるが、本実験に用いたような、比較的粒形のよい最大寸法20mmの粗骨材であれば、単位セメント量300~350Kg、細骨材率は40~45%程度で、単位水量は砕石を用いた場合110~125Kg、川砂利では105~120Kgの範囲内で、そのCF値が0.70~0.75となるコンクリートを用いるのが適当と思われる。
- 7) さらに、良品質の混和剤を用いると同一CF値をえるための単位水量が10Kg程度減少でき、とくに空気を連行しない減水剤の使用がその品質向上に効果的である。

## § 7. 結 語

即時脱型に用いる超かた練りコンクリートに対する蒸気養生の影響を調べ、強度特性、乾燥収縮、クリープ、水密性などの諸性質、混和材料の効果などについて検討し、即時脱型用コンクリートの適正配合について考察した本章の研究結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 超かた練りコンクリートでは養生期間を多少短縮することが可能であり、標準養生28日強度

- に対する蒸気養生したコンクリート相対強度は、一般製品用コンクリートの結果と大差なく、材令28日では標準養生より10～20%低下する。
- (2) 即時脱型を行なった場合には、前養生を少なくとも1時間以上とり、温度上昇速度を20 deg/h程度最高温度も低目の70℃前後として無理のない蒸気養生を行なえば、型わく養生と大差ない強度がえられる。
- (3) 曲げ強度および引張強度の場合は、標準養生に対する相対強度は圧縮強度の値より大きい。また、即時脱型を行なつた超かた練りコンクリートの材令28日における曲げ圧縮比はおおよそ1/7となつている。
- (4) 使用骨材が同じ場合、超かた練りコンクリートの動弾性係数と圧縮強度との関係は、成形方法、養生方法などがことなっても同じ指数式で示される。また、超かた練りの場合でも十分な締固めを行なったコンクリートでは、セメント水比説を適用することができる。
- (5) 超かた練りコンクリートの乾燥収縮は、スランプ数センチメートルの製品用コンクリートに比べて20～24%小さく、マチュリチー400℃・h前後で蒸気養生した場合、標準養生に比べて15～20%低減できる。また、即時脱型を行なうと型わく養生に比べて乾燥収縮がわずかに大きくなる傾向がある。
- (6) 即時脱型を行なった超かた練りコンクリートのクリープは、一般製品用コンクリートに比べておおよそ24～35%小さく、蒸気養生を行なうと標準養生に比べて多少低減される。また、クリープひずみは、富配合で水セメント比の小さいコンクリートほど小となる傾向がある。
- (7) 超かた練りコンクリートでも、一般製品用と同程度の単位セメント量を用い、強力な締固め成形を行なえば、水密性のよいコンクリートがえられ、蒸気養生後十分に湿潤養生したり、セメント量を増すことは水密性の改善に効果的である。
- (8) 空気連行性のない良質の減水剤や促進剤を即時脱型を行なう超かた練りコンクリートに用いると、その強度を10%前後高くすることができる。AE剤、減水剤などの使用は、同一CF値をえるための単位水量を超かた練りコンクリートでも多少減少できるが、AE剤による空気連行性は低下する。なお、良品質のフライアッシュを用いた場合は、初期強度は低い、材令28日への強度の伸びは良好である。
- (9) 超かた練りコンクリートを15Kg/cm<sup>2</sup>で加圧成形し、95℃で3時間の加圧養生を行なうと、蒸気養生に比べ、材令1日で平均46%、28日では平均26%強度が増加し、養生期間の短縮品質の向上には加圧養生がきわめて有利である。
- (10) 即時脱型を行なったコンクリートの強度は、形の変らない範囲内で単位水量を多目に、単位セメント量を増し、細骨材率は低目で、骨材粒度はあら目のほうが、また良質の混和剤を用いたものが強度は高くなり、充てん率やはだ面もよくなる傾向があり、とくに空気を連行しない良質の減水剤の使用が効果的である。
- (11) 即時脱型コンクリートの充てん率と強度とは密接な関係があり、充てん率が1%ますと強度は平均5%増加する。また充てん率のよいコンクリートはそのはだ面もよくなる傾向がある。
- (12) 道路、河海用などの水密性、耐久性などを要する製品を即時脱型方式によってつくる場合の適正配合は、使用材料や所要の品質によってことなるが、最大寸法20mmの粗骨材を用いる場合、単位セメント量300～350Kg、細骨材率は40～45%で、単位水量は碎石コンクリートで110～125Kg、川砂利コンクリートでは105～120Kgの範囲内で、そのCF値が0.70～0.75になるものを用いるのが適当であり、良質の減水剤を用いると単位水量を10Kg程度低減でき、その品質も向上する。

## 第 8 章 蒸気養生以外の促進養生

### § 1 緒 言

一般に、コンクリート製品工場では硬化促進方法として蒸気養生が使用されているが、石綿セメント製品や気泡コンクリート製品では高温高压蒸気養生すなわちオートクレーブ養生が用いられている。オートクレーブ養生では、常温養生の場合と結合材の水和反応がいちじるしくことなり、水熱反応によってセメントやこれに関連する物質の水和反応をいちじるしく促進することにあり、通常  $200^{\circ}\text{C}$ 、 $16$  気圧以下の高温高压で  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  系の反応を進めるものである。

蒸気以外の熱源を用いた特殊な促進養生も開発研究されている。とくに、電気養生あるいは電熱養生はわが国でも寒中コンクリートの施工の際に実用されており、ソ連、欧州では製品工場に採用されている。このほかにも、赤外線養生、高周波養生、油中養生などについても開発研究が進められている。また、わが国で工業化されている蒸気養生方法を改善した加圧養生やコンクリート中の自由水の蒸発防止を目的とした被膜養生などもある。このほか、硬化促進のためコンクリートを高温で練り混ぜて成形するいわゆるホットコンクリートも実用されている。

本章では、これらの硬化促進方法について概説したのち、オートクレーブ養生と電熱養生について 2、3 の検討を行なつた。

オートクレーブ養生は、わが国においては主として石綿セメント製品の製造の際に使用されているので、石綿セメントボードを対象として、とくに高炉セメントとケイ砂添加量の影響について検討を加えた。

また、電気養生については一般の寒中コンクリート工事に用いられている型わく加熱方式いわゆる電熱養生をとりあげコンクリート製品へ利用する場合を考慮し、スラブの電熱養生に関して基礎実験を行ない、また現場で特殊な製品に利用される電熱線養生の効果についても検討を加えた。

最後に、レデーミクストコンクリート工場、コンクリート製品工場、工事現場などではコンクリートの品質管理のために、28 日標準強度を早期に推定する必要もしばしば生じているので、促進養生によるコンクリート強度の早期判定も試みた。

### § 2. 蒸気養生以外の促進養生方法について

蒸気養生以外の促進養生方法としてはオートクレーブ養生、電気養生、電熱養生、高周波養生、赤外線養生、加圧養生、油中養生、被膜養生など種種の方法があり、既往の研究結果を調査し以下に述べる。<sup>428) 429) 430) 183) 431)</sup>

#### (1) オートクレーブ養生について

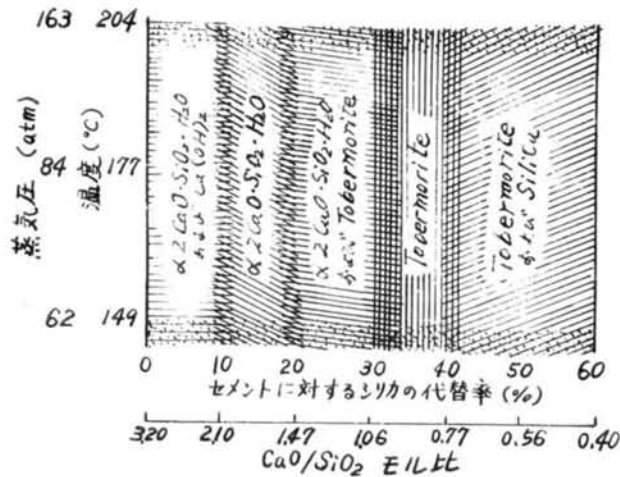
セメントのほか石灰、ケイ砂、スラグ、フライアッシュなどを原料として用い、直径  $2.0 \sim 3.0$  m、長さ  $30 \sim 40$  m 程度の気密のオートクレーブがまで温度  $175 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 、圧力  $8 \sim 15$  atm の高温高压処理すなわちオートクレーブ養生を行なうもので、養生直後に普通コンクリートの材令 28 日に相当する強度がえられる。諸外国では、このオートクレーブ養生による製品の製造が盛んに行なわれており、近年わが国でも、オートクレーブによるシリケートコンクリート製品の工業化が進められ、とくに気泡コンクリート<sup>432)</sup>が建築関係の構造部材として用いられている。<sup>433) 434) 435)</sup> 土木方面では、石綿セメント管やパイルがオートクレーブ養生によって製造されている。

微粉碎された石灰、ケイ砂、スラグなどと水との混合物は常温では不活性であるが、オートクレーブ処理によって低い塩基度のケイ酸カルシウム水和物いわゆるトベルモライトをつくり高強度の硬化体となるので結合材として用いられ、セメントを加えなくても水熱処理によって  $\text{CaO}-$

$\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  系の反応を進めることもできる。

オートクレーブ養生による水和生成物は竹本、<sup>436)</sup> Volzhensky、<sup>437)</sup> 須藤、<sup>438)</sup> Kalousek <sup>439)</sup> らの指摘しているように複雑で研究者によって多少見解がことなっている。ACI Committee 516の報告<sup>440)</sup>ではセメントとシリカとの混合物による水和生成物として図-2.8.1を示している。オートクレー

図-2.8.1 ポルトランドセメントとシリカを混合しオートクレーブ養生した場合の水和生成物<sup>440)</sup>



ーブ養生には活性のシリカ質混合材の添加がきわめて効果的で Menzel <sup>441)</sup> は 9.5 atm, 177 °C で 24 時間のオートクレーブ養生を行なった場合 25 ~ 35 % の混合率がもっともよい結果がえられたと述べている。なお、西村 <sup>434)</sup> はシリカ質混和剤を加えなくても、オートクレーブ用の混和剤え添加することによって緻密な水和物の結晶をつくり、強度を高めることができると報告している。

オートクレーブによる養生条件は一般に、① オートクレーブがまの温度と蒸気圧を上げる期間、② 製品を高圧で等温加熱する期間、③ オートクレーブがまの温度と蒸気圧を下げる期間、の 3 段階にわけられるが、①と③の段階では部材中に生じる熱応力、蒸気圧、水の移動などの影響によってコンクリートが破壊される危険性があるので、とくに、100 °C までの加熱と 100 °C からの冷却をゆるやかに行なう必要がある。コンクリートの強度は、等温等圧での加熱期間を長くすると増大するが、あまり熱処理期間を長くしたり、圧力を高くとりすぎると水和物の形が変わり内部構造がポーラスになるため強度が低下し、耐久性、凍害抵抗性なども悪くなる。<sup>437)</sup> ACI Committee 516 の報告<sup>440)</sup>によると、米国ではブロックの製造にオートクレーブ養生を使用しているが、前養生を 1 ~ 4 時間とったのち 3 時間で温度と圧力をあげ、5 ~ 8 時間 9 気圧 180 °C 程度で等温養生したのち冷却している。また、わが国の石綿セメント製品の例では、20 ~ 60 °C で数時間から 1 日の前養生をとり、約 2 時間で約 8 atm、175 ~ 180 °C まであげ 10 ~ 15 時間の等温等圧養生を行なったのち 3 ~ 5 時間で冷却を行なっており、上昇、冷却期間はシリケートコンクリート製品の場合に比べて短かくしている。

オートクレーブ養生したコンクリートの性質は使用材料、配合比、養生条件によってことなるが、1 日 1 サイクルの養生直後に、圧縮強度 200 ~ 500 Kg/cm<sup>2</sup>、引張強度 16 ~ 30 Kg/cm<sup>2</sup>、付着強度 30 ~ 40 Kg/cm<sup>2</sup>、弾性係数 1.5 ~ 2.7 × 10<sup>5</sup> Kg/cm<sup>2</sup> 程度の値が示されている。<sup>437)</sup> なお、圧縮強度は比重と密接な関係があり、単位容積重量 800 ~ 1600 Kg/m<sup>3</sup> の場合一般に 50 ~ 300 Kg/cm<sup>2</sup> の値となるが、最近オートクレーブに関する研究が進められ、PMライトの

のように人工軽量骨材の使用によって単位容積重量  $1300 \text{ Kg/m}^3$  で  $300 \text{ Kg/cm}^2$  程度の強度のものも造られるようになっている。なお、加圧してオートクレーブ養生すると普通の単位重量のコンクリートでは  $1000 \text{ Kg/cm}^2$  以上の高強度をえることもできる。オートクレーブ養生を行なうと乾燥収縮やクリープは半減するが、凍結融解に対する抵抗性は普通コンクリートより劣っている。

オートクレーブ養生には、安い材料が使用できること、単位重量をかえることができること、後養生が必要でないなどの特徴があるが、設備費が高く、今後経済的見地よりさらに検討する必要があると思われる。

## (2) 電気養生について

近年、プレキャスト部材の利用の盛んなソ連を中心に開発され、実用化されている促進養生方法である。<sup>442) 443)</sup> 型わくに電極板を取り付けて交流を通すと、コンクリート構成材料のうちセメントと骨材とは高い電気抵抗をもち熱の不良導体であるが、水の抵抗値が低いので、結局コンクリートは導体となって直接加熱されることになり、交流を使用しているので電気分解は起こらない。

電気養生の原理は電気エネルギーを熱エネルギーに変えることであり  $R(\Omega)$  の抵抗中を電流  $I(A)$  が時間  $t(\text{sec})$  流れるとジュールの法則によって

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (\text{J}) \quad \dots\dots\dots (2.8.1)$$

の熱を発生する。熱量を  $(\text{kcal})$ 、時間  $t$  を  $(\text{h})$  とすると、

$$Q = 0.864 R \cdot I^2 \cdot t \quad (\text{kcal}) \quad \dots\dots\dots (2.8.2)$$

となって、 $1 \text{ KWh}$  の電気エネルギーの使用により  $864 \text{ kcal}$  の熱を発生することになる。

コンクリートの抵抗値は、セメントペーストの性質や量によってかなり変化し、硬化が進むと液相の量がへり抵抗が大となるので、電圧をあげて所定の温度に保つ必要がある。また、養生期間中はコンクリートの温度が周囲の温度より高くなりコンクリート中の湿分が逃げる心配があるので、シートでおおって蒸発を防止しなければならない。

現在実用されている電気養生方法には、①型わく内側に電極板を取り付けに分離式の壁体を用いる方法、②たて打ち方式で加熱セルを用いる方法、③水平型わくの底部と上部メッシュを電極として用いる方法、④コンクリート中の鉄筋を用いる方法、⑤型わくに電熱線を取り付け型わくを加熱する方法（電熱養生と呼ばれる）などがある。<sup>442)</sup>

電気養生は、コンクリートを内部より加熱できるので、蒸気養生やオートクレーブ養生に比べて熱損失が少なく、養生期間が短縮でき、1日に2サイクルの型わく回転が可能になり、とくに熱伝導率の小さい軽量コンクリートに有利であるとされている。電気養生では、加熱時に両側面の型わくによってコンクリートが拘束されているので前養生は1時間前後とし、温度上昇速度は  $15 \sim 25 \text{ deg/h}$  で  $2 \sim 4$  時間加熱したのち、 $80^\circ\text{C}$  程度の最高温度で  $2 \sim 3$  時間の等温養生を行ない冷却している。とくに、密封型わくを用いた場合には  $40 \sim 80 \text{ deg/h}$  という急速な加熱も行なわれている。一般に採用されている1日2サイクルの電気養生条件は、前養生+温度上昇+等温+冷却期間 =  $1 + 2 \sim 3 + 2 \sim 3 (80^\circ\text{C}) + 4 \sim 5 \text{ h}$  となっている。

Mironov<sup>442)</sup> の研究によると、普通コンクリートでは電気養生の効果は蒸気養生とほぼ同じであるが、軽量コンクリートでは電気養生のほうが脱型時の強度を高めるのに有利な結果がえられている。また、Krylov<sup>444)</sup> らは電気養生したコンクリートの乾燥収縮は長期材令では標準養生より多少小さく、凍害抵抗性はほぼ同じであると述べている。Ganin<sup>445)</sup> は、電気養生したコンクリートの品質を改善するには、前養生期間を長くし、温度上昇速度をゆるやかにするのがよいと述べている。電気養生の場合、コンクリート中に塩化物を用いると鉄筋を腐食するので使用してはならない。また、鉄筋が存在すると過度の電流が流れコンクリートが破壊することがあるので配筋や絶縁には十分注意する必要があることが指摘されている。<sup>446)</sup>

なお、前田<sup>447)</sup> は直流を用いた場合の電気養生について理論的に研究し直流を用いると  $10 \sim 13\%$

の脱水効果があると報告しているが、水セメント比が小さいと脱水効果の少ないこと、悪影響をさけるためには最高温度 50 °C 以下にする必要のあることなどからかた練りコンクリートの促進養生には不向きと思われる。

電気はエネルギー源として比較的高価であり、経済性も問題になるが、スラブ、パネルなどの板状製品の量産に適しており、今後十分研究を進める必要があろう。

### (3) 電熱養生について

電気養生の一種であり、型わくに抵抗の大きい発熱体である電熱線を取り付け、これに通電して外側よりコンクリートを加熱する方法である。わが国では、寒中コンクリート工事に保温のため実用されている例が多いが、<sup>448)</sup>製品工場でも特殊の形状の製品、大型の製品、蒸気養生の困難な場合などに使用され、欧州では型わくの底板に発熱体を取り付け電熱養生する方法も実用化されている。<sup>449)</sup>型わくの外面を保温効果の高いシートでおおうと電熱養生の効果をより高めることができる。なお、電熱養生については、その効果について 2、3 の検討を行ない本章で報告した。

### (4) 高周波養生について

高周波養生は高周波数の強力な電磁場にコンクリートをおいて加熱する方法で、高周波電力発振器としては極真空管を用いた自励発振器が使用され、一般に 1 Mc/sec 以上の高周波が用いられる。型わくの底面を下部電極とし、コンクリート面より 2～5 cm 離して上部メタル電極をおき通電すると、この電界の中でコンクリートは全断面均一に加熱される。<sup>450)</sup>Dolgoplov<sup>450)</sup>の研究によると 2～15 Mc/sec の高周波電流を通した場合、10～30 分間に 80～90 °C まで均一な加熱ができ養生期間も短縮できると述べており、一般に高周波加熱と電気養生とを併用すると有利であることを示している。高周波加熱は軽量コンクリートの促進養生に適しているが、急激な加熱を加なうとひびわれを生じるおそれがあるので注意しなければならない。

### (5) 赤外線養生について

赤外線電球をコンクリート面に照射して加熱する方法で、乾燥するおそれのある場合には水分の蒸発を防止する必要がある。赤外線加熱には、①迅速で効率のよい加熱ができる、②温度調節が容易である、③エネルギーの供給が容易である、④設備が簡単であるなどの特徴があり、ソ連やチェコスロバキヤでは実際の工場で検討を行なっており、照射器とコンクリート面は 7～10 cm が適当で、トンネル式の養生室の利用も効果的であると述べている。<sup>451)</sup>Dani lov<sup>451)</sup>の研究では、蒸気養生に比べて型わくの回転が 1.5～1.8 倍となり経済的であると述べている。わが国では、梶井<sup>452)</sup>らの研究があり、前養生期間を 4～6 時間とするとコンクリート面のカバーのいらないうこと、蒸気養生に比べて養生時間の短縮されること、長期強度の伸びのよいことなどを指摘している。今後、実際の製品工場で検討する必要があると思われる。

### (6) 加圧養生について

まだ固まらないコンクリートを加圧し、過剰の水分をしぼり出し、その圧力を保持したまま、100 °C の高温で養生する方法を加圧養生、加圧蒸気養生、圧力養生、加圧高温養生などと称しており、本研究でも超かた練りコンクリートの成形の際に取りあげて検討し、材令 28 日で平均 26 % 強度が増加していることを指摘した (p.247 参照)。

この方法は吉田博士<sup>139)</sup>によって開発されたもので、100 Kg/cm<sup>2</sup> の加圧力で 3 時間沸騰水中で養生し、材令 28 日で 1040 Kg/cm<sup>2</sup> の高強度をえており、加圧状態で養生することが大切である。実際に工業化されており、一般に 10～20 Kg/cm<sup>2</sup> の加圧力を用いている。加圧養生によって高強度のえられるのは①加圧によって水セメント比が小となる、②コンクリート中の空気が排除される、③養生中の熱膨張が拘束され緻密な硬化体になるなどのことが考えられ、10～20 Kg/cm<sup>2</sup> の加圧によって水セメント比は 6～9 % 低下している。

すでに述べたように加圧養生では養生期間の短縮が可能であり (p.247 参照)、成形後にだけに 100 °C の養生室に入れ 3 時間程度養生を行なっている。加圧養生したコンクリートは、

強度が高く、耐久性、水密性も改善され、乾燥収縮は小となる。

なお、加圧養生の一種に、高林によって開発された真空処理工法を併用した、真空加圧養生もある。<sup>369), 453)</sup>

(7) 油中養生について

高温の油中でコンクリートを養生する方法で、<sup>454)</sup> Agamoglanov の研究があり、<sup>371)</sup> 100℃以上の加熱が可能であるが、加熱＋等温＋冷却期間＝2＋2（100℃）＋2hが最適で、養生直後の強度は標準養生28日強度に近く、油がしみ込んで防水されるので、耐久性、水密性が増すと述べている。なお、前養生期間が短かいと微細ひびわれを生じるので数時間の前養生をとるのがよいとされている。

(8) 被膜養生について

セメントペーストの完全結合水量はおおよそ37%程度と報告されているので、<sup>109)</sup> アスファルト乳剤や塩化ビニール系の被膜養生剤をコンクリート面に塗布して自由水の蒸発を防止して水和を進めるもので、日中の高温を利用すればかなり効果的でしかも経済的な方法と考えられる。

<sup>455)</sup> Stupakov は夏期の高温を利用して被膜養生による硬化促進について検討しているが、被膜養生しないものに比べて10%強度が大となっており、蒸気養生を行なう場合にも被膜養生剤を塗布しておくとし養生効果が大きくなったと報告している。屋外で成形し、脱型を急がない製品ではその実用性について検討してみる必要があろう。

(9) 高温練りませ、高温成形について

使用材料を高温にして練りませ、コンクリートの成形温度を高くすると短時間に所要の脱型強度がえられる。この方法は、高温の蒸気をミキサに吹き込み、コンクリート温度を40～50℃に高め、成形してからも引続き型むく加熱を行なうもので、ホットミキシング、ホットミックス、ホットコンクリートなどと呼ばれている。<sup>372)</sup> 熊坂の報告によると外国では、成形温度を65℃としている例もあるが、<sup>191)</sup> 温度が高すぎると締固めが困難となったり、Reinsdorf の指摘しているように、標準養生に比べて長期強度が低下するので十分に注意しなければならない。

以上の促進養生の中ではオートクレーブ養生、加圧養生、高温練りませ以外はわが国の製品工場場で実用されている例は少ないが、それぞれ特徴があり、養生方法の改善と関連し、将来さらに研究を進める必要のある問題であると考えられる。

### § 3. オートクレーブ養生した石綿ボードの強度におよぼす使用セメントと原料配合比の影響

(1) 実験の概要

オートクレーブ養生に用いられる基本的結合材はセメントとケイ砂であり、高温高圧下で反応し、カルシウムシリケート水和物のトベルモライトをつくるが、セメント、ケイ砂のほか石灰、スラグなどの混和材を用いることもできる。とくに高炉スラグは常温では活性度が低い<sup>170</sup>℃以上の水熱反応によってきわめて活性になり、高炉セメントもオートクレーブにはきわめて効果的であると報告されているがわが国では十分に研究されていない。また、オートクレーブ養生による硬化体の品質を向上するため、シリカ質微粉末が混合され、<sup>441)</sup> Menzel の研究によるとポルトランドセメントに対する最適量は<sup>30</sup>%と報告されている。

したがって、ここではセメントの種類とケイ砂の混合量をかえてオートクレーブ養生を行ない、その適正配合について検討を行なった。

セメントは表-2.8.1に示す普通ポルトランドセメントおよびC種高炉セメントを使用し、混合したケイ砂の試験成績は表-2.8.2のとおりである。

実際の石綿セメント製品の配合を参考にして結合材と石綿との配合比を5：1の割合とし、固形分の5倍量の水を加えて混合した（表-2.8.3参照）。なお、C種高炉セメントについては、SO<sub>3</sub>が1.5%のものとこれにセッコウを加えてSO<sub>3</sub>が2.0%になるよう成分調整したセメン



表 - 2. 8. 1 使用セメントの主な化学成分と物理的性質

セメント の 種 類	主 な 化 学 成 分 ( % )					物 理 的 性 質								
	Si O <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	比重	ブレン 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			安定性	圧縮強さ(Kg/cm <sup>2</sup> )		
								水量 ( % )	始 発 ( h-m )	終 結 ( h-m )		3 日	7 日	28日
普 通	22.0	5.3	3.3	64.7	1.8	3.17	3280	26.5	1-54	2-54	良	137	236	404
C種高炉	29.4	11.5	2.1	49.4	1.5	3.00	4200	30.2	7-00	9-00	良	57.1	140	355

表 - 2. 8. 2 ケ イ 砂 の 試 験 結 果

化 学 分 析 結 果 ( % )								物 理 試 験 結 果	
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	(R <sub>2</sub> O)	比 重	ブレン比表面積(cm <sup>2</sup> /g)
89.2	3.0	1.1	2.5	0.3	1.74	1.34	2.62	2.70	3560

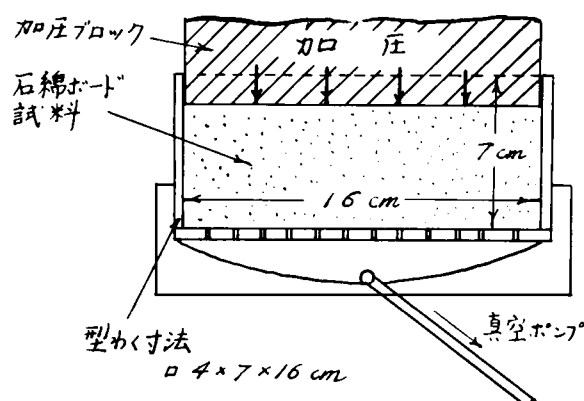
表 - 2. 8. 3 実験に用いた石棉セメントボードの配合

セメントの種類	セメント + ケイ砂 (g)			石 綿 (g)	水 (cc)
	I	II	III		
普通セメント	65 + 35	60 + 40	55 + 45	20	固形分の 5 倍 量 600
C種高炉セメント(SO <sub>3</sub> 1.5%)	65 + 35	60 + 40	55 + 45	20	
C種高炉セメント(SO <sub>3</sub> 2.0%)	65 + 35	60 + 40	55 + 45	20	

も用いた。

まず、固形分(セメント+ケイ砂+石棉=120g)を十分に混合し600ccの水を加えて4分間攪拌しにのち、図-2.8.2に示す型わくと手順によって加圧成形を行なった。

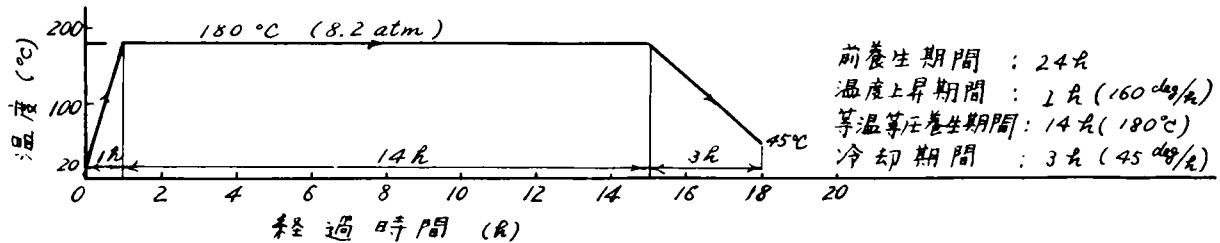
図 - 2. 8. 2 型わく寸法と石棉ボードの加圧成形法



- ① 真空ポンプで余分の水をひく。
- ② 十分水がひいたのち加圧ブロックをのせる。
- ③ アムスラー型100t万能試験機を用い2-3 kg/secの荷重速度で100%まで加圧する。
- ④ さらにこの荷重を30秒間持続する。
- ⑤ 脱型は、型わくの底板をはずし、裏返しにした状態で側わくを押し上げて行なう。

脱型後、温度  $20^{\circ}\text{C}$  相対湿度  $100\%$  の湿気箱に入れ  $24$  時間の前養生をとったのち、図 - 2.8.3 に示す条件でオートクレーブ養生を行なった。なお、オートクレーブ養生装置は、ASTM C 151-56<sup>456)</sup> に規定しているセメントの安定性試験用のものを使用した。

図 - 2.8.3 オートクレーブ養生条件

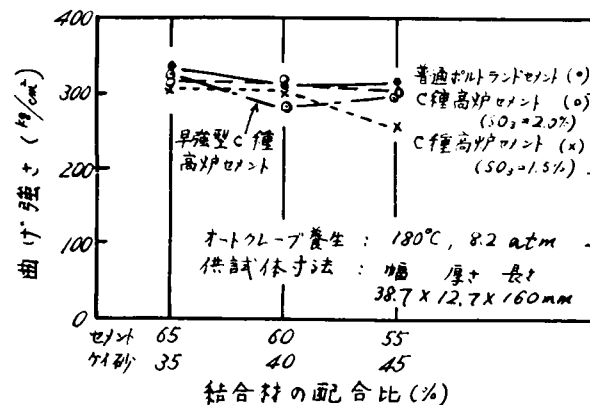


オートクレーブ養生を終了した供試体は、湿度  $20^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度  $85\%$  の恒温室に放置し、翌日強さ試験を行なった。強さ試験は  $10\text{ t}$  万能試験機を用い、3等分点載荷法（スパン、 $\ell = 12\text{ cm}$ ）で曲げ強さ試験を行なった。

## (2) 実験結果の考察

セメントとケイ砂との配合比をかえた3種セメントについて配合比と曲げ強さとの関係を示した図 - 2.8.4 にみられるように普通セメントのほうがC種高炉セメントより多少曲げ強さが高い傾向

図 - 2.8.4 石綿ボードの配合比と曲げ強さ



にあるが、C種高炉セメントで  $\text{SO}_3 = 2.0\%$  としたものとは大差がない。C種高炉セメントで  $\text{SO}_3$  が  $2.0\%$  のものと  $1.5\%$  のものとの強度を比べると後者がいくぶん強度が低く、オートクレーブ養生に対してもセッコウ量を少し多目にしたほうが有利な結果がえられている。しかし、須藤<sup>458)</sup>は普通ポルトランドセメントの場合はセッコウ量が比較的少なくてよいことを指摘している。

つぎに、セメントとケイ砂との配合比に関しては、 $\text{SO}_3$   $1.5\%$  のC種高炉セメントの  $55:45$  の配合比をのぞけば、本実験に用いた配合比の範囲内では強度に大差がないが、ケイ砂の配合比が大となるとわずかに下がる傾向がみられ  $65:35$  前後の配合比が適当と思われる。

Bozhenov<sup>457)</sup>らの研究によると高炉スラグを用いた場合、ケイ砂の配合比を  $50\%$  としたものが高強度を与えたと報告しており、ケイ砂の混合比を多少高くしてもさしつかえないと考えられる。

なお、早強ポルトランドセメント ( $\text{SiO}_2=21.2\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3=4.8\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3=2.8\%$ ,  $\text{CaO}=66.1\%$ ) に高炉スラグ ( $\text{SiO}_2=32.6\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3=15.2\%$ ,  $\text{CaO}=40.7\%$ ,  $\text{MgO}=5.8\%$ ) を 35 : 65 の割合で混合し試製した早強型の C 種高炉セメントについて配合比をかえて実験を行なった結果、図-2.8.4 に示したように若干のばらつきはみられるが、セメントとケイ砂との配合比 65 : 35 の場合は普通ポルトランドセメントに近く、もっとも高い強度を示している。

結局、オートクレーブ養生する石棉セメント製品に C 種高炉セメントの使用は可能であり、高炉セメントとケイ砂との配合比は 65 : 35 前後が適当であると考えられる。なお、凝結時間が長くなるのでオートクレーブ養生するまでの前養生を実際の製品では長くする必要があると思われる。

#### § 4. 銅製金網を用いたコンクリートの電熱養生

##### (1) 実験の概要

電熱養生は、わが国では寒中コンクリートの施工に使用されているが、欧州ではコンクリート製品工場に適用されている例があり、工場製品へ利用する場合の基礎資料をえるため型わく底板を加熱体とするコンクリートの電熱養生について検討を行なった。

普通ポルトランドセメント (比重 = 3.16, 28 日圧縮強さ  $41.2 \text{ Kg/cm}^2$ ) を使用し、粗骨材は最大寸法 25 mm の安倍川砂利と荒川砂 ( $\text{FM}=2.76$ ) を用いた。コンクリートの配合は表-2.8.4 に示す単位セメント量 350 Kg, 水セメント比 45.7% のものである。

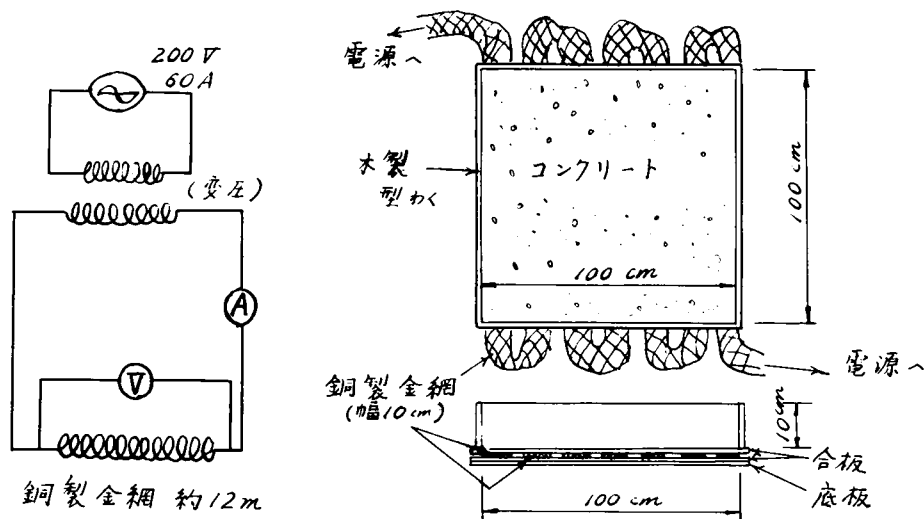
表-2.8.4 使用したコンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 ( $\text{Kg/m}^3$ )			
				水 W(Kg)	セメント C (Kg)	細骨材 S (Kg)	粗骨材 G (Kg)
25	5 ~ 6	45.7	42	160	350	800	1120

コンクリートは練りませののち、所定の電熱養生用の木製型わくに詰め、締固めには、振動数、8000 vpm の棒形振動機を用いた。

電熱養生を行なうための型わくは、図-2.8.5 に示すように縦、横が 100 cm で高さが 10 cm

図-2.8.5 電熱養生を行なうための型わくと配線図



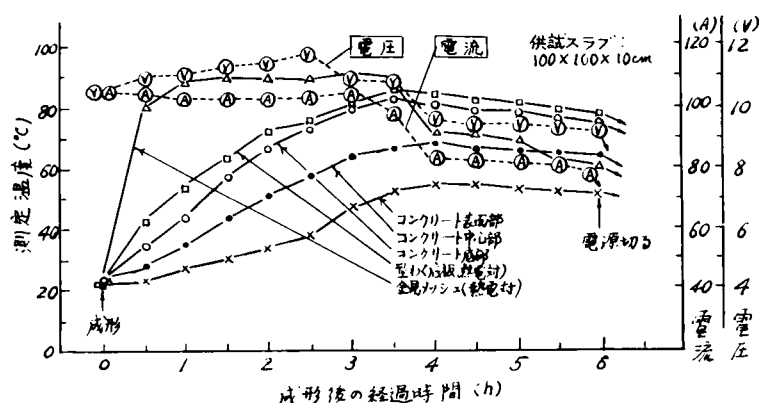
の内寸法になるよう木わくを組み、発熱体を取り付けた底板上に固定した。すなわち、幅 10 cm の銅製金網を発熱体として 2 枚の合板の間にはさんで、これを木板の上面にはりつけて組み立てたスラブ用の型わくである。電源は 200 V、60 A を用いトランスによって銅製金網 1 m 当り 1 V の電圧になるよう調整して通電し、電熱養生を行なった。電熱養生中、電圧および電流の大きさを測定し、また銅製金網、型わく底板、コンクリート中心部と表面部の温度を銅・コンスタンタン熱電対とアルコール温度計を用いて実測した。

電熱養生を終了した供試体は、翌日 10×10×10 cm 立方供試体をスラブより切りとり、材令 1 日、7 日および 28 日で圧縮強度試験を行なった。供試体数は 1 材令につき 3 個とした。また、比較のために成形の際に  $\phi 10 \times 20$  cm 円柱形型わくにコンクリートを詰め、標準養生を行なって、電熱養生の結果と比較した。電熱養生終了後の供試体は所定材令まで 20 °C 水中養生を行なった。

## (2) 実験結果の考察

電熱養生中の温度測定結果を示した図 - 2.8.6 にみられるようにコンクリートの表面部と発熱体に近い型わく底部とでは加熱時に 30deg、等温養生時でもおおよそ 20deg の温度差がみられ、養生中にコンクリート面より水分の蒸発がみとめられるのでコンクリートの露出表面を湿布でおおって、乾燥を防止する必要がある。

図 - 2.8.6 電熱養生の際のコンクリート、型わくなどの温度測定結果



通電開始後 6 時間で電源を切り、その後はスラブ表面にシートをかけてクーリングを行なったのち、翌日カッターで供試体を切りとり、材令 1 日、7 日および 28 日で圧縮強度試験を行なった結果を表 - 2.8.5 に示す。

表 - 2.8.5 電熱養生および標準養生したコンクリートの圧縮強度

養生条件	供試体寸法	圧縮強度 (Kg/cm <sup>2</sup> )		
		1 日	7 日	28 日
電熱養生 (50~80 °C)	□ 10×10×10 cm	123 (34)	244 (68)	357 (100)
標準養生 (20 °C)	φ 10×20 cm	53.5 (13)	262 (64)	411 (100)

この結果にみられるように、材令 1 日で 123 Kg/cm<sup>2</sup> の値がえられており、脱型強度はかなり高い値を示している。標準養生 28 日強度に比べると電熱養生を行なったコンクリートの強度はかなり低い、材令 28 日で 357 Kg/cm<sup>2</sup> (標準養生強度の 87%) の値がえられており、設備

の簡単なことを考慮するとかかなり効果的な促進養生方法であると考えられる。しかし、電力の消費量、作業上の危険性などの問題もあり、経済的利用については今後十分に研究を進める必要がある。

結局、スラブのような板状製品では、底板を発熱体とした型わく加熱方式による電熱養生方法も促進養生方法の一つとしてかなり効果的なものであり、この方法を採用する場合には、コンクリート表面よりの水分の蒸発の防止と保温に注意する必要があるといえる。

## § 5. 特殊な製品に対する簡易電熱養生の利用

### (1) 実験の概要

蒸気養生室への搬入が困難な寸法の大きい製品や蒸気の配管の困難な場所に用いられる電熱線を型わくに巻きつけて行なう簡単な電熱養生の効果について、製品工場で実物のトラフ（排水樋）<sup>350)</sup>を用いて検討を行なった。

#### 1) 使用材料とコンクリートの配合

普通ポルトランドセメント（比重＝3.15，ブレン比表面積＝3330  $\text{cm}^2/\text{g}$ ，28日圧縮強さ＝416  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ）とB種高炉セメント（比重＝3.16，ブレン比表面積＝3750  $\text{cm}^2/\text{g}$ ，28日圧縮強さ＝400  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ）とを用い、さらに混和材としてフライアッシュ（比重＝2.17，ブレン比表面積＝3820  $\text{cm}^2/\text{g}$ ，28日圧縮強さ比＝78%， $\text{SiO}_2=56.5\%$ ， $\text{Al}_2\text{O}_3=26.3\%$ ）を使用した。なお、硬化促進剤として一般工業用の塩化カルシウム（ $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）も用いた。粗骨材は小倉川産で最大寸法25mmのもの（ $\text{FM}=6.98$ ，比重＝2.64）、細骨材は鬼怒川、荒川混合砂（ $\text{FM}=2.69$ ，比重＝2.63）を使用した。

出荷時のコンクリートの所要強度は250  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ であり、トラフには水密性も要求されるので、単位セメント量を300～320  $\text{Kg}$ 、水セメント比を50～53%、スランブ4～7cmを目標にセメントの種類をかえ、また、普通セメントの一部をフライアッシュで代替した表2.8.6に示す4種配合のコンクリートを用いた。

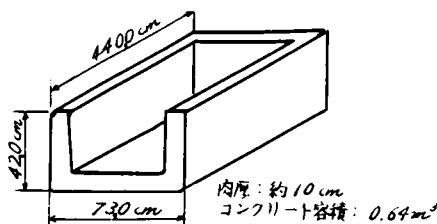
表-2.8.6 使用コンクリートの配合

配合 No.	使用 セメント	粗骨材の 最大寸法 (mm)	実測 スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (Kg/m <sup>3</sup> )					
						水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	促進剤
A	普通	25	6.5	53	40	170	320	—	750	1130	—
B	高炉	25	6.0	52	38	166	320	—	715	1170	—
C	高炉	25	5.0	53	38	160	320	—	720	1180	$\text{CaCl}_2$ 1% / セメント
D	普通	25	4.5	50	40	160	260	60	755	1130	—

#### 2) 実験方法

浄水場に使用される供試トラフの概略図を図-2.8.7に示す。主鉄筋は径16mmの異形鉄筋、

図-2.8.7 供試トラフの概略図



腹鉄筋は径9mmの普通丸鋼であり、鉄筋量は約2%、かぶりは約3.5cmとなっている。

型わくはメタルホームを使用した。容量1m<sup>3</sup>のパンタイプミキサを用いて2分間攪り混ぜたコンクリートを、運搬車で型わくのそばまで運び、打ち込んだのち棒形振動機を用いて十分に締固めを行なった。なお、強度試験用供試体はφ10×20cmの円柱形型わくを用いて、突き棒による2層詰めで作成した。

供試トラフは、屋外で成形してから2時間後メタルフォームの周囲に500Wのニクロム線を3重に巻いて通電し、16時間の電熱養生を行なった。なお、養生中はトラフに防水シートを2層にかけて保温に努めた。電源を16時間で切ったのち、シートをかぶせたまま2時間ほど保温養生を続け、さらにシートを取り去って1～2時間クーリングを行ない、成形後22時間で脱型した。なお、型わくは1日1回転を目標とした。脱型後は3日間、屋外の水そう(25～27℃)で養生し、その後は気乾状態で屋外養生すなわち空中養生を行なった。

圧縮強度試験用の供試体は型わくのまま、トラフ成形型わくのそばに置き、トラフと同様に電熱養生を行なったもの、電熱養生を行なわないで常温の外気中に置き空中養生したものとし、1日(脱型時)、4日(水切り時)、14日および28日で試験を行なった。なお、屋外で成形は行ない、脱型後は20℃の水中で養生する標準養生供試体も作成し、材令7日および28日で圧縮強度試験を行なった。

また、電熱養生の効果を調べるため、トラフおよびコンクリート供試体にアルコール温度計を埋め込み、コンクリート温度を実測した。なお、供試トラフの品質判定には、シュミットハンマーを用い、トラフ上面のコンクリートの反発かたさ(R値)を求め、脱型時には型わく側面のコンクリートのはだ面も調べた。

## (2) 実験結果とその考察

4種配合のコンクリートを用い、電熱養生したトラフの反発かたさ(R)および各種養生条件による円柱供試体の圧縮強度試験結果を表-2.8.7に示す。

表-2.8.7 円柱供試体の圧縮強度およびトラフの反発かたさ

配合の 種類	試験項目	養生条件	コンクリートの材令				
			21時間 (脱型時)	4日 (水切り時)	7日	14日	28日
A	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	電熱養生	74 (14.2)	189	—	326	358
		空中養生	64	180	—	350	360
		標準養生	—	—	220	—	369
	トラフの反発かたさ (R)		21	27	29	33	36
B	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	電熱養生	52 (18.6)	108	—	240	257
		空中養生	25	104	—	262	284
		標準養生	—	—	148	—	295
	トラフの反発かたさ (R)		15	23	27	31	33
C	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	電熱養生	105 (14.2)	169	—	256	320
		空中養生	74	151	—	259	327
		標準養生	—	—	184	—	300
	トラフの反発かたさ (R)		24	30	33	35	37
D	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	電熱養生	82 (15.9)	180	—	305	360
		空中養生	59	168	—	302	362
		標準養生	—	—	215	—	365
	トラフの反発かたさ (R)		24	30	34	36	37

注: ( ) 内は電熱養生と空中養生との比。 — : 30点より小さい値

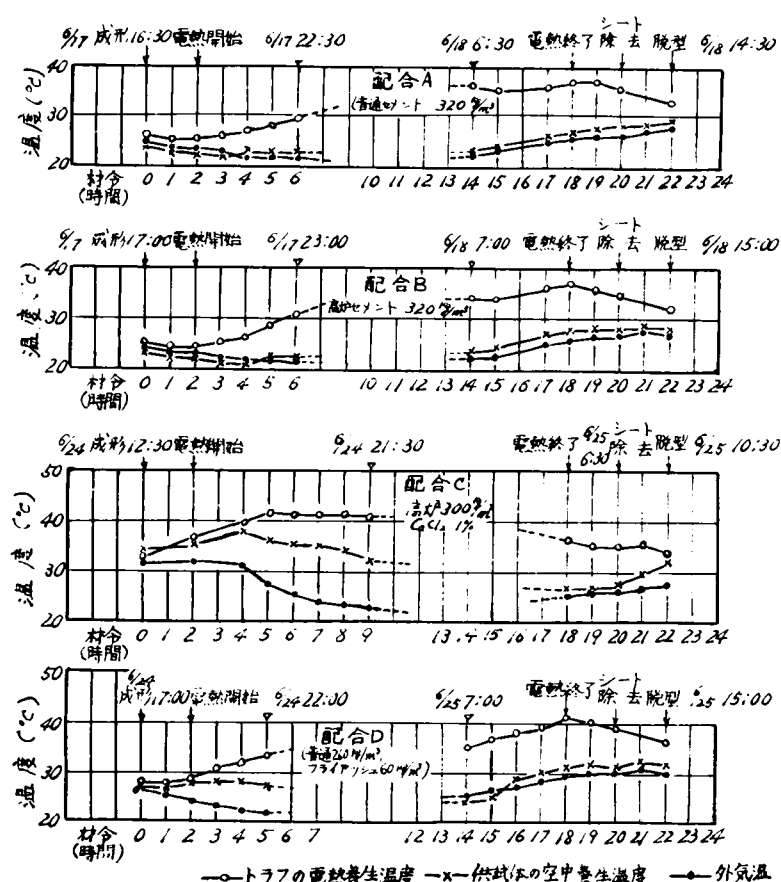
### 1) 電熱養生の効果について

表-2.8.7に示したように、材令1日では各配合のコンクリートとも電熱養生した場合の強

度が空中養生の結果より40～80%高くなり、高炉セメント単味の配合をのぞけば、このトラフの脱型可能な強度80%以上の値がえられている。材令4日になると空中養生がおいつき、材令14日および28日ではほぼ同じか空中養生がわずかに高くなる傾向がある。なお、標準養生28日強度は、塩化カルシウムを用いたC配合のぞくともつとも高いが、比較的外気温が高かつたので他の養生方法と大差を示さなかつたものと思われる。

供試トラフ、コンクリート供試体および外気の温度履歴の実測結果を示した図-2.8.8にみられるように、電熱養生した場合のトラフのコンクリート温度は10～15deg 空中養生より高い。電熱養生の際のマチュリチーを計算すると600～800℃・hとなり、空中養生の場合より200～300℃・h高くなり、平均気温が25℃以下の場合、所要の脱型強度をえるのに電熱養生を行なうのが望ましい。なお、配合A、BおよびCは夕方コンクリートを成形し

図-2.8.8 供試トラフ、円柱供試体および外気の温度履歴



ているので打込み温度は22～28℃であったが、配合Cは日中に成形したので最高温度は4時間あまりで40℃に達しもっとも高い。したがって、日中の高温を利用して昼間に成形するのが養生効果をあげるのに有利である。

配合Bの高炉セメントのコンクリートは空中養生に比べて電熱養生の効果は大であるが、脱型強度が低く、これを改善するには配合Cのように促進剤を加えるか、Royak<sup>199)</sup>らの指摘しているように養生温度をより高くする必要があるだろう。鉄筋コンクリート部材に塩化カルシウムを用いてもひびわれの発生がなければさびの心配は少ないとの報告もあるが、むしろ減水促進剤<sup>458)</sup>の使用が適当と考えられる。内割で20%のフライアッシュを用いた配合Dは良好な結果がえら

れているが、これは良品質のフライアッシュであったこと、減水効果により水セメント比が小となったこと、他の配合よりいくぶんスランプの小さかったことなどのためと考えられる。なお、本実験に用いた電熱養生費はKWh当り5.6円で計算して4.5円であり、比較的安価である。

気温の高い時期は、この程度の電熱養生で脱型可能であるが、気温の低下する冬期においては養生温度を50℃程度まで高め、とくに保温に注意する必要があると思われる。また、1日1サイクルの工程の場合、22時間養生では余裕がないので、養生時間を18～20時間とし昼間成形し、翌朝脱型するのがもっとも段取りがよいといえる。

## 2) 供試トラフの反発かたさと脱型時期について

シュミットハンマーによるトラフの反発かたさは表-2.8.11に示したように、配合Aは21、配合Bで15、配合CおよびDは24であり、この換算強度はそれぞれ約100 Kg/cm<sup>2</sup>、40Kg/cm<sup>2</sup>および130 Kg/cm<sup>2</sup>となり供試体の管理強度と比べて配合Dをのぞくとほぼ同じ傾向を示している。反発かたさ15の配合Bを用いたトラフもクレーン車で水平に吊りあげ脱型できたが、シュミットハンマーによる測定の際にプランジャーの凹みがコンクリート面に残ることから考えて反発かたさ20以上で脱型することが望まれる。なお、反発かたさ20の換算強度は90 Kg/cm<sup>2</sup>であり、脱型可能強度とはほぼ一致している。したがって、製品の脱型の可否を判定するのにシュミットハンマーによる反発かたさで管理する方法は、トラフのような実際の製品ではきわめて実用的なものであると考えられる。

## 3) 配合とコンクリートの表面状態について

型わくに接したトラフ表面の仕上り状態いわゆるコンクリートのはだ面は、各配合に顕著な差はないが、高炉セメントを用いた配合Bと普通セメントにフライアッシュを加えた配合Dがやや良好でありコンクリートも比較的ワーカブルであり、とくに高炉セメントを用いたものは表面の色合が多少白っぽくなる傾向がみられる。また、仕上り状態をよくするために良質のAE剤や減水剤の使用も考えられるが、空気連行性のものでは気ほうの集まることも考えられる。コンクリートのはだ面は、型わくに塗布するはく離剤とも関係することが指摘されており、この点とも関連づけて今後研究を進める必要があると思われる。なお、この試験には、はく離剤として水溶性のアカシヤ4号(アカシヤ化工KK製)を使用した。<sup>459)</sup>

## (3) ま と め

コンクリート型わくに電熱線を巻きつけシートをかけて行なうようなごく簡単な電熱養生によってもコンクリート温度を自然養生より10～15℃高めることができ、脱型強度を40～80%とすることができ、とくに、日中の高温を利用して成形し電熱養生すると、その養生効果を高めることができる。また、実際の製品ではシュミットハンマーによる反発かたさによって脱型時期の判定が可能である。

## § 6. 促進養生によるコンクリート強度の早期判定

### (1) ま え が き

打設したコンクリートの品質を管理するための強度は、一般に材令28日おける圧縮強度を基準としている。この結果の判定には日時を要するので、レディーミクストコンクリート工場、コンクリート製品工場、工事現場などでは、コンクリートの品質や工程の管理のために28日強度を早期に推定する必要がしばしば生じている。

一般に、28日強度の推定値は、信頼度の高い値がえられるならば推定時期は早いほどよく、近年、各国で研究が行なわれているが、従来の方法にはつぎのようなものがある。

#### ① 同一条件の7日強度より推定する方法

従来より用いられてきたもっとも一般的な方法で、つぎの表-2.8.8に示すような方法がある。



表-2.8.8 コンクリートの7日強度より28日強度の推定式

研究者	28日圧縮強度推定式 ( $\sigma_{28}$ , $F_{28}$ )	備 考
日本建築学会 <sup>465)</sup> (JASS5)	$F_{28} = 1.35 F_7 + 3.0$	打込み養生温度 $21 \pm 3^\circ\text{C}$
吉田徳次郎博士 <sup>466)</sup>	$\sigma_{28} = \sigma_7 + 6.6\sqrt{\sigma_7}$	最小値 $6.6 \rightarrow 4$ , 最大値 $6.6 \rightarrow 10.7$
セメント協会 <sup>467)</sup>	$\sigma_{28} = 1.24 \sigma_7 + 6.6$	$21 \pm 3^\circ\text{C}$ , $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 円柱供試体
Slater <sup>468)</sup>	$\sigma_{28} = \sigma_7 + 8\sqrt{\sigma_7}$	$\phi 15 \times 30\text{cm}$ 円柱供試体
オレゴン州道路協会 <sup>468)</sup>	$\sigma_{28} = 1.51 \sigma_7 + 3.43$	$300\text{Kg}/\text{cm}^2$ 以下のコンクリート

注) 普通セメントを使用したコンクリート

## ② 促進養生した供試体の早期強度より推定する方法

この方法は、早期に推定できる点でももっともすぐれており、現在各国で研究が進められており、わが国では十代田らの報告がある。<sup>460), 461), 464), 462) 463)</sup>

## ③ 材令と初期強度との関係式を求め推定する方法

Goral<sup>469)</sup> は材令7日までの初期強度と材令との関係式を求め28日強度を推定し、その誤差は4%程度となつてゐる。供試体数と試験回数の多くなる欠点がある。

結局、コンクリートの工場、工事現場などを対象として早期強度判定法に対する条件を考えると、1) 推定時期の早いこと、2) 推定精度のよいこと、3) 装置および取り扱いの簡単なこと、4) 供試体数の少ないこと、5) 養生条件の変動の影響が少ないこと、6) 広範囲のコンクリートに適用できること、7) 再現性のよいこと、などが要求され、総合的に考えると促進養生による方法がもっとも好都合であると思われる。

したがって、促進養生にも種種の方法があるが、温度管理のもっとも容易な温水養生をとりあげ、実際のレデーミクストコンクリート工場および製品工場に使用されている代表的な配合を用いて、促進強度と28日強度との関係を求め、とくにレデーミクストコンクリート用配合の場合、実際の工場への適用も試み、7日強度より推定する場合と比較して検討を行なつた。<sup>470)</sup>

## (2) 実験の概要

### 1) 使用材料と供試コンクリート

表-2.8.9 および表-2.8.10 に示す品質の普通セメントおよび早強セメントを使用した。粗骨材は安倍川産で最大寸法  $25\text{mm}$  のもの、細骨材は荒川産のものでそれぞれ  $25 \sim 20$ ,  $20 \sim 10$ ,  $10 \sim 5\text{mm}$  および  $5 \sim 1.2$ ,  $1.2 \sim 0.6$ ,  $0.6\text{mm}$  以下の3種粒度区分にふるい分けて用いた。使用した骨材の品質を表-2.8.11 に示す。

表-2.8.9 使用セメントの化学成分

セメントの種類	ig. loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Total	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
普通	0.6	0.1	22.3	5.0	3.2	65.1	1.5	1.5	99.3	53.0	24.0	7.8	9.7
早強	0.9	0.1	20.8	5.0	3.0	66.1	1.0	2.6	99.5	65.6	10.2	8.2	9.1

表-2.8.10 使用セメントの物理的性質

セメントの種類	比 中	比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	凝 結 時 間			安定性 (ハート)	フリック	曲げ強さ ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )				圧縮強さ ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )			
			水量 (%)	始 発 時 分	終 結 時 分			1 日	5 日	7 日	28 日	1 日	5 日	7 日	28 日
普通	5.16	5250	26.9	2-10	5-12	良	245		33.5	50.1	69.8	-	140	236	420
早強	5.15	4550	29.5	2-00	2-52	良	254	52.0	53.0	65.2	82.2	102	218	352	464

表-2.8.1.1 使用した骨材の物理的性質

骨材の種類	ふるいを通るものの重量百分率									粗粒率 (FM)	比重	吸水量 (%)	粒形判定係数 (%)	有機不純物試験
	20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm					
鳴門砕石(N)	100	85	35	4	0	0	0	0	0	6.61	2.60	1.28	59.5	—
吉野川砂利(G)	100	86	35	2	0	0	0	0	0	6.63	2.61	1.30	64.7	—
吉野川砂	100	100	100	100	92	73	44	9	1	2.81	2.62	1.16	—	合格

使用したコンクリートは、レデーミクストコンクリート工場で実用されている一般の土木、建築用配合を参考にして、スランプ8～9cm、14～15cmおよび20～21cmを目標とした3種の配合をえらび、それぞれについて水セメント比は実用上の範囲を考慮して5種選定した。さらに、普通セメントを用いた場合はAEコンクリートも用いた。また、かた練りの製品用配合は粗骨材の最大寸法を20mmとし、スランプを2～3cmおよび6～7cmのものを選定した。実験に用いた配合を表-2.8.1.2および表-2.8.1.3に示す。

表-2.8.1.2 使用したレデーミクストコンクリート用配合(最大寸法=25mm)

目 標 ス ラ ン プ (cm)	普通セメント、フレーションクリート*					普通セメント、AEコンクリート**						早強セメント、フレーションクリート*				
	W/C (%)	W kg	C kg	s/a %	実 測 スラン プ (cm)	W/C (%)	W kg	C kg	s/a %	実 測 スラン プ (cm)	実 測 空気量 (%)	W/C (%)	W kg	C kg	s/a %	実 測 スラン プ (cm)
8 9	62	166	267	43	9.0	60	148	247	41	8.5	5.3	60	170	283	43	9.0
	57	166	293	42	8.5	55	148	269	40	8.5	5.6	55	170	309	42	9.0
	50	162	324	41	9.0	50	148	296	39	9.0	5.2	50	170	340	41	10.0
	45	162	360	40	8.5	45	148	329	38	8.5	4.5	44	166	380	40	9.0
	41	164	404	39	8.0	40	148	370	37	9.0	4.5	41	172	424	39	9.0
14 15	65	176	271	46	15.0	67	161	239	44	14.5	5.6	67	184	273	46	14.5
	59	173	294	45	14.0	61	158	259	43	14.5	5.1	61	182	297	45	14.0
	53	172	322	44	14.5	55	156	284	42	14.5	5.7	57	183	323	44	14.5
	48	170	354	43	14.5	50	156	312	41	14.5	4.8	52	183	356	43	14.0
	44	171	393	42	14.5	46	158	346	40	14.5	4.8	47	183	396	42	15.0
20 21	70	195	279	49	20.5	70	175	250	47	21.0	4.3	69	199	288	49	20.5
	65	195	300	48	20.5	65	175	269	46	20.5	5.5	64	199	310	48	20.5
	59	193	326	47	20.5	59	173	293	45	20.5	4.8	59	199	336	47	20.0
	54	193	356	46	20.5	54	172	319	44	20.5	5.2	55	200	365	46	20.5
	49	193	391	45	20.5	49	172	351	43	20.0	4.6	50	200	402	45	20.5

\*AE剤を用いない普通のコンクリート(Non AEコンクリート)。\*\*空気量4.5～0.5%を目標に、AE剤(ビソフルレジン)を使用。

表-2.8.1.3 使用したコンクリート製品用配合(最大寸法=20mm)

目標 スランプ (cm)	W/C (%)	W (Kg)	*C (Kg)	s/a (%)	実測 スランプ (cm)	目標 スランプ (cm)	W/C (%)	W (Kg)	*C (Kg)	s/a (%)	実測 スランプ (cm)
2～3	4.8	151	312	4.3	2.5	6～7	5.7	159	281	4.3	6.0
	4.4	151	346	4.2	2.5		5.2	159	308	4.2	6.5
	3.9	151	390	4.1	3.0		4.6	159	342	4.1	6.5
	3.4	152	444	4.0	2.5		4.1	159	386	4.0	6.0
	3.1	160	514	3.9	2.5		3.7	163	439	3.9	6.5

\* 普通ポルトランドセメント使用

コンクリートの練りまぜには容量 50ℓ の可傾式ミキサを用い、供試体の作成はすべて  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{deg}$ 、相対湿度 80～90% の恒温室内で行なった。各スランブのコンクリートとも  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  の円柱形型わくに 2 層詰めし、各層ごとに突き棒で 15 回突き固め成形した。供試体数は 1 配合について、促進養生、標準養生 7 日および 28 日のもの各 3 本、計 9 本とした。

## 2) 促進養生とその条件

促進養生装置としては、簡単で取り扱いが容易であり、しかも現場向きで、温度を均一に保つことができる写真 - 2.8.1 に示す温水養生そうを用いた。促進養生条件は、前養生時間を相当に長くとっても圧縮強度に悪影響がなく、しかも表面仕上げを行ない脱型してから養生できることを考慮し、図 - 2.8.9 に示す条件を採用した。なお、マチュリチーを高くしたほうが促進強度は大となるが午前中に脱型して養生し午後試験を行なう段取りを考えて温水養生期間を 5.5 時間とした。

写真 - 2.8.1 温水養生そうと温度調節板

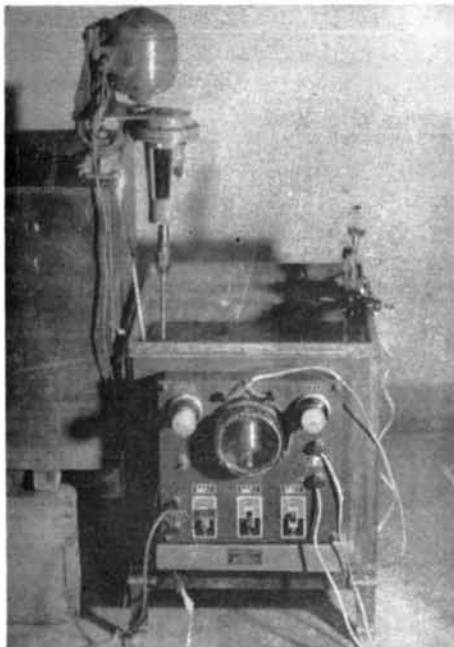
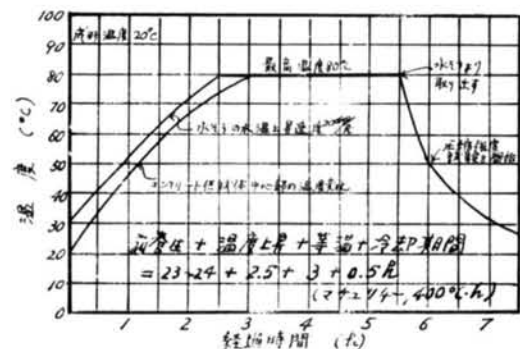


図 - 2.8.9 促進養生条件とコンクリート供試体の実測温度



所定期間、促進養生を行なった供試体は、ただちに水そうより取り出し  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{deg}$  の恒温室に移し、30分後に圧縮強度試験を行なった。この場合、供試体の温度は  $45 \sim 50^{\circ}\text{C}$  であり、成形後の経過時間はおおよそ 30 時間である。

促進強度と比べ、この値との関係式を求めるために標準養生 7 日および 28 日強度も試験した。なお、これらの測定値の変動係数を求めると、測定値 155 個のうち 5% を越えるものは 6 個であり、全変動係数の平均値は 2.0% であった。

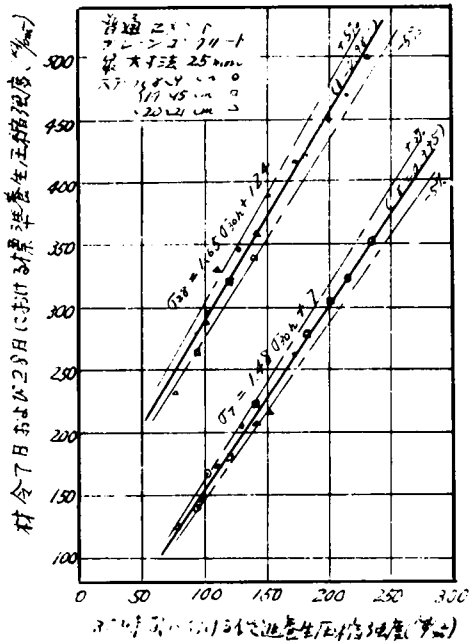
## (3) 実験結果とその考察

### 1) 促進養生強度と標準養生強度との関係

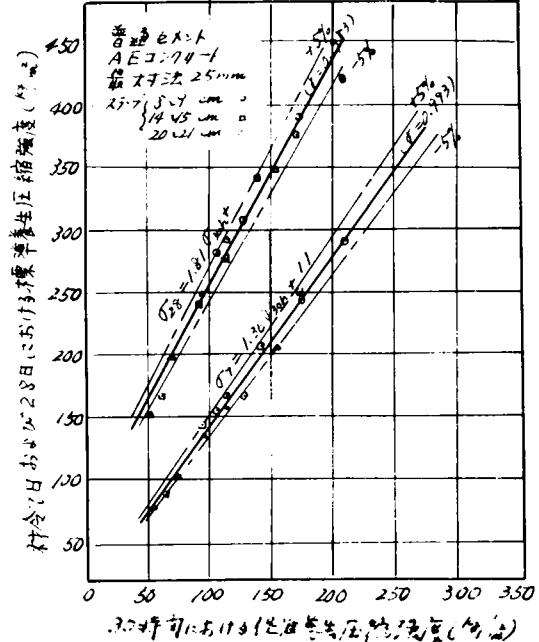
普通セメントを用いたプレーンと AE コンクリート、早強セメントのプレーンコンクリートおよび普通セメントの製品用コンクリートについて、促進強度と標準養生 7 日および 28 日強度との関係を図 - 2.8.10 (1)～(4) に示す。これらの結果にみられるように、3 種コンクリートともスランブや水セメント比がかなりことなるにもかかわらず、促進強度と標準強度との関係はほぼ直線上にプロットされる。したがって、最小 2 乗法によって 1 次式を求め図に記入した。

図 - 2. 8. 1 0 促進養生強度と標準養生7日および28日強度との関係

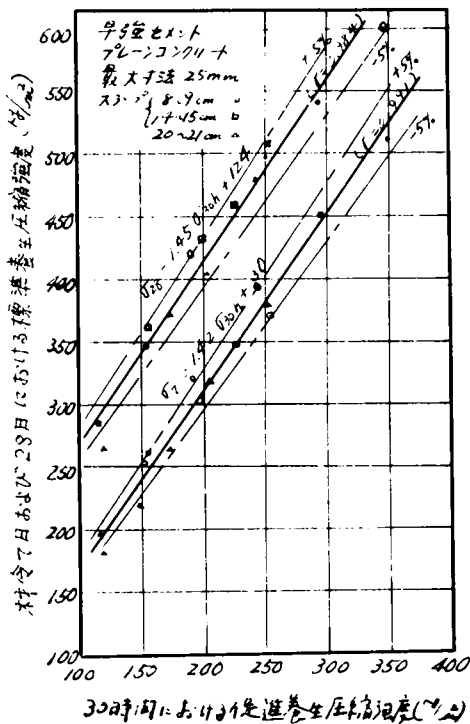
(1) 普通セメントのプレーンコンクリートの場合



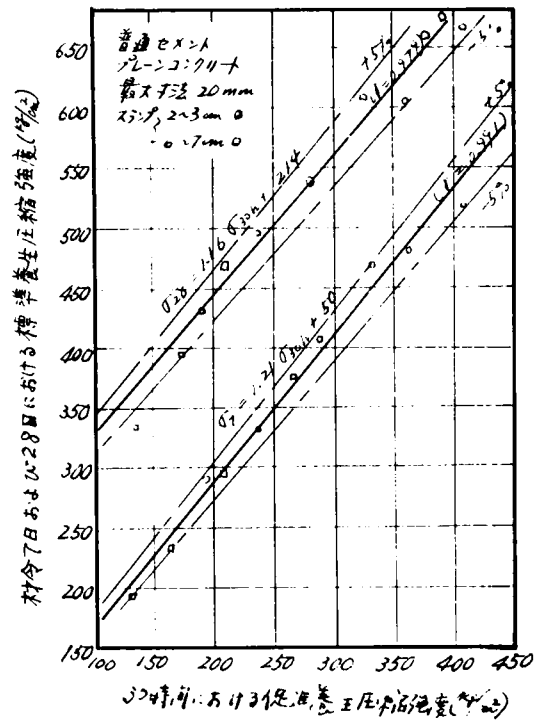
(2) 普通セメントのAEコンクリートの場合



(3) 早強セメントを用いたプレーンコンクリートの場合



(4) 普通セメントを用いた製品用の圧入練りコンクリートの場合



また、±5%の範囲を示すと大部分の値がこの中に含まれ、相関係数も1に近い値となっている。普通セメントを用いたプレーンとAEコンクリートとの結果を比べると、同じ促進強度に対して後者がやや高い標準強度を示す。早強セメントのコンクリートは同じ促進強度に対して普通セメントの場合より7日標準強度が高く、短期材令の強度発現が顕著であることを示している。また、製品用コンクリートでは水セメント比の範囲がことなるので、一般工事用コンク

リートに比べて直線の勾配が多少ことなっている。

一般に、水セメント比の範囲が広くなると促進強度と標準強度との関係は曲線になる傾向があり、RILEMの報告<sup>461)</sup>でも研究者になってまちまちで1次式と2次式の両方の推定式が示されている。レデーミクストコンクリート工場や製品工場で常用されている水セメント比の範囲であれば、直線式で示してさしつかえないと考えられる。

## 2) 標準養生7日強度と28日強度との関係

各種コンクリートについて標準養生7日強度と28日強度との関係を求めると表-2.8.14のとおりである。標準養生7日強度が170～300 Kg/cm<sup>2</sup>の範囲であれば、28日強度の推

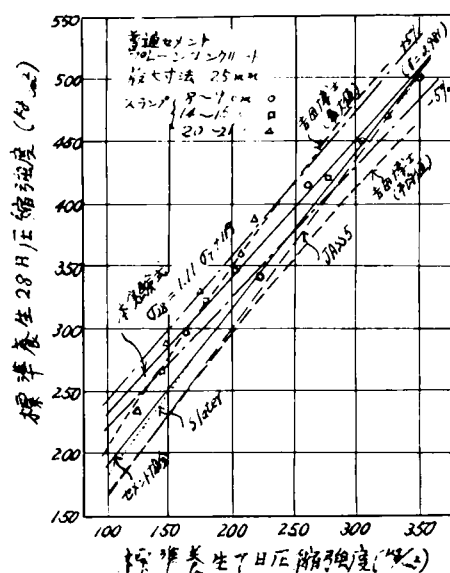
表-2.8.14 標準養生7日強度と28日強度との関係

コンクリートの種類		$\sigma_7$ と $\sigma_{28}$ との関係式	相 関 係 数
レデーミクスト コンクリート用	普通セメント プレーン	$\sigma_{28} = 1.11\sigma_7 + 119$	0.981
	普通セメント AE	$\sigma_{28} = 1.32\sigma_7 + 65$	0.975
	早強セメント プレーン	$\sigma_{28} = 1.02\sigma_7 + 96$	0.986
製 品 用	普通セメント プレーン	$\sigma_{28} = 0.95\sigma_7 + 168$	0.990

定値は、プレーンおよびAEコンクリートとも大差ない。早強セメントは短期の強度が大きいので、材令7日より28日への伸びは小さい。

普通セメントを用いたコンクリートで7日強度より28日強度を推定する場合、従来より用いられているおもな式は表-2.8.8に示したが、これらの式はある程度安全率を見込んでいるので、図-2.8.11にみられるように、本実験式に比べて多少低い安全側の値を示している。

図-2.8.11 普通セメントを用いたプレーンコンクリートの7日強度と28日強度との関係



種種の要因によってコンクリートの強度発現の様相はことなるので、すべての場合に適用できる式を求めることは困難である。推定精度をよくするためには、実際の工場、現場で使用されている材料、配合、成形方法、養生条件などを用いて数多く試験して求めた推定式を使用するのが望ましい。

レデーミクストコンクリート用配合を使用して本実験でえられた促進強度と28日強度、7日強度と28日強度との関係式を用いて、実際の生コン工場より出荷されているコンクリートについて28日強度の推定を試みた。

レデーミクストコンクリート工場より工事現場に出荷する運搬車より、表-2.8.15に示す9種の配合のコンクリートを採取し、それぞれの配合について $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 円柱形型わく9

[illegible]

本にコンクリートを成形し試験に供した。なお、供試体採取の時期は午前中とし、成形後は外気温と大差のない温度の工場の試験室に放置し、夕方表面仕上げを行なった。翌日脱型した供試体は実験室に持ち帰り、写真-2.8.1に示した温水養生そうを用い、図-2.8.9の条件で促進養生を行なったのち試験に供した。この促進強度を本実験でえられた推定式に入れて7日および28日の圧縮強度を推定し、 $21^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{deg}$ の水そうで養生し、材令7日と28日で実測した強度と比較検討した。

促進強度および7日強度より28日強度の推定値ならびに実測値を表-2.8.16に示す。この結果にみられるように促進強度より28日強度を推定した場合、推定誤差が10%をこえる

配 合 No	促進強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	促進強度より 7日強度の相定値 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	7日強度 相定値 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	28日強度の相定値 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )			28日強度 相定値・・・ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
				促進強度による	7日強度による	JASS5による・・・	
1. N-PI	175	267 (+70)	287	414 (+138)	458 (+56)	417 (+101)	464
2. "	177	259 (+50)	285	416 (+57)	455 (+18)	412 (+68)	441
3. N-AE	109	159 (+102)	177	274 (+115)	299 (+52)	269 (+129)	509
4. "	115	167 (+67)	177	285 (+59)	501 (+07)	272 (+104)	505
5. "	107	158 (+61)	159	271 (+120)	275 (+107)	245 (+204)	508
6. "	82	125 (+109)	138	225 (+66)	247 (+25)	216 (+104)	241
7. "	106	155 (+48)	182	262 (+135)	505 (+19)	276 (+113)	511
8. "	96	142 (+60)	151	251 (+119)	264 (+74)	254 (+179)	285
9. H-PI	190	500 (+84)	282	400 (+66)	584 (+24)	562 (+55)	575
10. "	195	507 (+75)	286	407 (+74)	586 (+24)	566 (+54)	579

-277-

ものもあり、平均で9%であったが、一方、標準養生7日強度よりの推定値は実測値に多少近く、推定誤差が平均で4%でありかなり良好な結果がえられている。

促進強度からの推定誤差が大きくなった理由としては、①成形、前養生の温度が15～17℃と低かったこと、②したがって標準養生では強度の伸びのよいこと、③前養生期間が推定式を求めた場合より2～3時間短くなったこと、④標準養生時の水温の幅が多少広いこと、⑤同じ品質のセメントでも製造工場、製造時期によって化学成分、粉末度など若干の変動はさけられないこと、⑥使用骨材、使用A E剤がことなることなどが考えられる。

なお、表-2.8.16にみられるように普通セメントは安全側の値が推定されたのに対し、早強セメントでは危険側の推定値となったが、今回用いた早強セメントは実験式を用いた場合のものより早期強度発現が多少大きく、セメントの品質の変動は推定精度に影響する大きな要因であると考えられる。また、日本建築学会のJASS5による推定値も示したが、本実験でえられた7日強度よりの推定値に比べて多少低い値を示している。

(5) まとめ

促進強度による28日強度の推定方法はきわめて短時間で推定結果の判明する利点があり、工場、現場などで実際に使用されているセメント、骨材、混和材料を用い、各種配合のコンクリートについて数多く実験を行なって推定式を求め、促進養生条件を厳密に管理して強度推定を行なえば、推定精度が高くなり、7日強度から推定する場合と同様に数パーセント以内の誤差で推定が十分可能であると考えられ、十分に実用性のある早期強度判定法であると思われる。とくに、成形温度や同一品種のセメントにおける化学成分、粉末度などの品質の影響について考慮すれば、さらに精度のよい推定が可能になると思われる。

## § 7. 結 語

蒸気養生以外の促進養生に関して調査し、オートクレーブ養生製品に対する高炉セメントの使用、電熱養生方法の製品への利用、促進養生による圧縮強度の早期判定など、実際の工場に関連する、2、3の問題について検討した本章の結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 蒸気養生以外の促進養生では、オートクレーブ養生、加圧養生、高温練りませのほかはわが国の製品工場で実用されている例はほとんどないが、電気養生、高周波養生、赤外線養生などそれぞれ特徴があり、外国では実際に使用されている例もあるので今後の養生技術の改善、向上のために製品の製造方法と関連づけて、これらの経済的利用方法について検討する必要がある。
- (2) オートクレーブ養生を行なう石綿セメント製品にはC種高炉セメントを用いても普通セメントを用いたものに近い強度がえられ、高炉セメントとケイ砂との混合率は65：35前後が適当である。
- (3) スラブのような板状製品では、型わく底板に発熱体を取り付けた電熱養生も促進養生方法の一つとしてかなり効果的であり、この場合、コンクリート表面よりの水分の蒸発を防止し、保温効果を高めるために、表面をシートで被覆するのがよい。
- (4) 特殊なあるいは大型のコンクリート製品では、型わくの周囲に被覆電熱線を巻きつけ、シートで保温して行なう簡単な電熱養生によってもコンクリートの初期強度を40～80%高めることができ、とくに日中の高温を利用して成形を行ない電熱養生するのが効果的である。
- (5) 実際のコンクリート製品の脱型時期をシュミットハンマーの反発のかたさによって判断することができ、トラフのような製品では反発かたさ20（換算強度90 Kg/cm<sup>2</sup>）以上になると脱型が可能である。
- (6) 促進養生による初期強度と材令28日の圧縮強度との関係を求めておけば、促進強度によって標準強度の早期判定が可能になる。とくに、実際の工場での使用材料と配合を用いて、数多くのデータより推定式をつくり、促進養生を厳密に管理して推定を行なえば、数パーセント以内の誤差で推定ができると考えられる。

コンクリート製品に採用されている蒸気養生方法の改善や蒸気養生を行なつたコンクリートの品質向上を目的として、製品用のかた練りコンクリートを蒸気養生し、セメント、混和材料などの使用材料と配合、蒸気養生条件などの影響を調べて最適養生条件について検討し、さらに蒸気養生がコンクリートの諸性質におよぼす影響についても究明した。また、蒸気養生期間の短縮の可能性についても検討し、さらに即時脱型を行なう超かた練りコンクリートの蒸気養生やその他の促進養生についても論じた。これらの研究結果をまとめるとつぎのとおりである。

- (1) 蒸気養生用セメントとしては  $C_3S/C_2S$  比が大きく、粉末度のかなり高い早強型のものが適しており、市販のセメントの中では早強ポルトランドセメントの使用が養生期間が短縮でき、脱型時に高強度がえられて有利であり、超早強ポルトランドセメントも経済性に問題はあがすぐれている。また、普通ポルトランドセメントや混合セメントを用いる場合には蒸気養生効果を高めるために、 $70 \sim 80^\circ\text{C}$  の高目の最高温度にするのがよい。とくに、混合セメントは前養生期間を長目にし、蒸気養生した場合も初期強度が劣るので脱型を急ぐ場合には促進剤の添加が必要になる。
- (2) 脱型強度の改善、養生期間の短縮など蒸気養生効果を高める混和材料としては、促進剤、減水促進剤などの使用が有利であるが、塩化カルシウムは鉄筋を腐食する心配があるのでその使用にあつては注意しなければならない。AE 剤を用いたコンクリートでは前養生期間をやや長くするのがよいが、良質の減水剤を用いる場合には普通コンクリートと同じ養生条件で、しかもコンクリートの品質を高めることができる。フライッシュを用いる場合には前養生期間を多少長くし、養生温度を高目にし、代替率も 20% 以下にするのがよい。なお、人工軽量骨材を用いた場合でも普通コンクリートの場合と少くとも同程度の蒸気養生効果がえられる。
- (3) 常温成形の場合、前養生期間は 2～5 時間とるのが望ましい。成形温度が低くなると、前養生期間を多少長くする必要があるが、蒸気養生を行えば  $20^\circ\text{C}$  成形の場合とほぼ同じ脱型強度がえられ、蒸気養生後低温で養生しても、以後の強度発現は良好である。最高温度を高くすると、脱型時の強度は高くなり、長期の品質に悪影響を与えないで  $70 \sim 80^\circ\text{C}$  の最高温度の採用は可能である。なお、等温度養生期間にコンクリートの硬化が進み、強度発現が顕著になるが、養生効果をより高めるためにはできるだけ長く徐冷を行ない、しかも蒸気養生後もできるだけ長く湿潤養生を続けるのがよい。
- (4) 蒸気養生の際の最適養生条件は、セメントの品質、配合、工程、部材の寸法、所要の品質などによつてこととなるが、1 日 1 サイクルの型わくの回転を目標に、比較的高強度の土木用製品を対象として普通ポルトランドセメントを用いた場合を考えると、

前養生 + 温度上昇 (上昇速度) + 等温養生 (最高温度) + 冷却期間

$$= 2 \sim 5 + 2 \sim 3 (15 \sim 20 \text{ deg/h}) + 2 \sim 3 (60 \sim 80^\circ\text{C}) + 6 \sim 10 \text{ h}$$

の条件で、所要強度、成形温度などによつて全養生期間を 12～18 時間とする条件が推奨される。なお、早強ポルトランドセメント、促進剤などを用いる場合や夏期の高温成形の場合には、前養生を 1～2 時間の短縮することができる。

- (5) 蒸気養生の際のマチュリチーと脱型時の圧縮強度との間には密接な関係があり、 $1000^\circ\text{C} \cdot \text{h}$  まではマチュリチーの増加とともに脱型強度は大となるが、この値以上に大きくしても強度はほとんど伸びない。また、この関係はセメントの種類によつてことなり、標準養生 28 日強度の 50% の値をえるには、普通ポルトランドセメントのコンクリートでは  $800 \sim 900^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ 、早強ポルトランドセメントのコンクリートでは  $550 \sim 650^\circ\text{C} \cdot \text{h}$  のマチュリチーが必要であ



る。なお、マチュリチーと強度との関係が成立するのはごく初期材令で、材令が経過すると適用できない。

- (6) 蒸気養生を行なつたコンクリートの長期材令への強度増進率は標準養生に比べて劣り、圧縮強度は材令7日で標準養生したものとはほぼ同じになり、材令28日では標準養生より10～15%低い値となる。曲げ強度、引張強度、付着強度、曲げ引張ひずみ、動弾性係数なども同様の傾向にあるが、材令28日の標準養生の値に対する低下率は圧縮強度の場合よりも小さい。また、乾燥収縮は蒸気養生によつて10～30%低減するが、その割合は最高温度が高く、養生期間の長いほど大きい。蒸気養生後、十分に湿潤養生を行えば、凍害抵抗性は標準養生の結果と大差ない。
- (7) 型わくの回転を早くするため短時間の蒸気養生を行なう場合、ややセメント量の多い350%のコンクリート配合を用い、使用セメントによつてつぎの養生条件を採用すれば、脱型時におおよそ100%の圧縮強度をえることができる。

普通ポルトランドセメントの場合： $2+2(30\text{deg/h})+1(80^{\circ}\text{C})+2\text{h}=7\text{h}$

早強ポルトランドセメントの場合： $1+2(25\text{deg/h})+1(70^{\circ}\text{C})+2\text{h}=6\text{h}$

なお、良質の減水促進剤、促進剤などを用いると、さらに1時間程度の養生期間の短縮が可能となる。また、短時間養生を行なつた場合、1次養生ののち2回目の蒸気養生を行なうと所要の品質を早期にえるのに効果的である。短時間養生の場合、よりきびしい条件を採用するとひびわれを発生するおそれがあるので前養生期間と温度上昇速度とに十分に注意が必要である。

- (8) 単位水量のきわめて少ない超かた練りコンクリートでは、一般製品用コンクリートに比べて多少養生期間を短かくできるが、即時脱型を行なつた場合には、前養生期間を1時間以上とり、温度上昇速度は $20\text{deg/h}$ で、最高温度は $70^{\circ}\text{C}$ 程度の蒸気養生条件が望ましく、これによつて型わく養生と大差ない強度がえられる。また、適正な配合を用い、十分な締固めを行なえば高強度で水密性のよいコンクリートがえられ、スランブ数センチメートルのコンクリートに比べて乾燥収縮やクリープはかなり低減できる。なお、超かた練りコンクリートでも、セメント水比と強度との関係や動弾性係数と圧縮強度との関係を一般製品用コンクリートと同様に求めることができる。
- (9) 即時脱型を行なつたコンクリートの強度は、その充てん率と密接な関係があり、充てん率を1%ますと圧縮強度、曲げ強度とも平均5%程度増加し、コンクリートのはだ面もよくなる傾向がある。充てん率を高めるには、脱型後変形しない範囲内で単位水量をやや多目に、単位セメント量も貧配合を避けて $300\sim350\text{Kg}$ とし、細骨材率は40～45%、骨材の粒度はややあら目とするのがよい。とくに、空気を連行しない良質の減水剤の使用は、即時脱型を行なうような超かた練りコンクリートの品質向上に効果的である。

- (10) 蒸気養生以外の促進養生にもそれぞれ特徴があり、特殊な製品では十分に有用性をもっている。とくに、加圧したままで蒸気養生あるいは高温養生を行なう加圧養生は、加圧量15%、加圧時間3分で加圧成形し、その圧力を保持したまま $95^{\circ}\text{C}$ で3時間養生した場合、コンクリートの材令28日の強度は、加圧しないで蒸気養生( $3+2.5+2(70^{\circ}\text{C})+2.5\text{h}$ )を行なつたものに比べて、平均26%増加しており、養生期間の短縮と強度改善、品質向上にきわめて効果的な方法である。また、養生条件を厳密にし、実際の使用材料と配合を用いて促進養生による強度と材令28日強度との関係を求めておけば、この促進強度よりかなりの精度で28日強度の推定を行なうことができる。

近年、建設工事の各分野でコンクリート製品が用いられる傾向にあるが、製品を製造する際の基礎的な問題として、振動台による締固め成形と蒸気養生とを取りあげ、コンクリートの品質向上、成形施工技術の改善などを目的として、使用材料や配合と関連づけて基本的な研究を行なった。

すなわち、振動締固め成形に関しては、川砂利、碎石および人工軽量骨材を用い、単位セメント量、単位水量、コンシステンシー、混和材料などの配合をかえたかた練りコンクリートを振動台の振動数、振幅、加速度、振動時間などの振動条件をかえて成形し、主として圧縮強度によつて締固め効果を判定し、使用材料や配合と最適締固め条件について究明し、また、即時脱型用の超かた練りコンクリートの締固め条件についても調べた。さらに、製品用コンクリートのワーカビリティ・コンシステンシーにおよぼす単位水量、単位セメント量、細骨材率、実積率、A E 剤、温度などの影響をスランプ試験、V B 試験、C F 試験などによつて測定し、試験方法や配合を修正する場合の基準についても検討を行なった。

つぎに、蒸気養生に関しては、主として川砂利を用いたかた練りコンクリートを種類の条件で蒸気養生し、セメント、混和材料などの使用材料と配合や前養生期間、温度上昇速度、最高温度などの蒸気養生条件の影響を総合的に調べ、最適蒸気養生条件について検討し、さらに蒸気養生がコンクリートの諸性質におよぼす影響についても調査した。また、型わくの回転率を高めるため最近問題になっている蒸気養生期間の短縮の可能性や即時脱型を行なう超かた練りコンクリートの蒸気養生条件、超かた練りコンクリートの諸性質、適正配合などについても検討を行なった。

これらの研究によつてえられた主な成果はつぎのとおりである。

- (1) 振動台によるコンクリートの最適締固め条件は、従来よりの研究結果では研究者によつて見解がかなりことなっているが、一般の振動締固め製品用のスランプ数センチメートル以下のコンクリートを対象として検討し、最適締固め条件は使用骨材、配合、ワーカビリティ・コンシステンシーなどによつて相違することを明らかにした。すなわち、川砂利を用いたコンクリートの締固め条件は、スランプ 0.5 ～ 2 cm のごくかた練りでは振動数 5 0 0 0 ～ 6 0 0 0 vpm、振幅約 1.0 mm、加速度 1.3 ～ 2.0 g が適当であるが、コンシステンシーが大きくなると振動数 4 0 0 0 ～ 5 0 0 0 vpm、振幅約 0.8 mm、加速度 5 ～ 1.3 g と低い振動数や加速度で十分に締固めが可能であり、かた練りになるほど締固め時間を長くする必要のあること、また、碎石コンクリートの最適締固め条件は川砂利コンクリートの場合と大差ないが、川砂利コンクリートより振動締固め時間をいくぶん長く 4.5 ～ 6.0 秒とするのがよいこと、良質の A E 剤や減水剤を用いるとコンクリートのワーカビリティがよくなるので締固めが容易になり振動時間を短かくできること、さらに人工軽量骨材を用いたコンクリートでは造粒型あるいは非造粒型のような粗骨材の形状によつて最適締固め条件は多少こととなるが、普通コンクリートより低い振動数や加速度で締め固めることができることなどを明らかにした。
- (2) コンクリートの締め固めの際の最適振動数については、高振動数説と低振動数説とに意見がわかれているが、7200vpm、10800vpm のような高振動数の振動台を用いて締固めを行なうと、一般製品用コンクリートでは比較的短時間で締固めが行なわれ、コンクリートのはだ面がよくなる傾向が見出された。しかし、スランプ数センチメートルのコンクリートでは、同じ加速度の低振動数の振動台で締め固めた場合の圧縮強度と大差なく、コンクリートのコンシステンシーが大きくなると振動数の影響は小となる傾向がえられた。また、即時脱型を行なう超かた練りコンクリートでは、同じ種類の振動台であれば振動数や加速度を大きくしたほうが締固め効果が大きく、振動時間も 6.0 秒前後が適当であるが、碎石コンクリートでは同じ加速度の振動台あれば低振幅で高振動数より高振幅で低振動数のほうが締固め効果はよくなる傾向がえられた。なお、横方向の振動も加わつた鉛直回転方式の振動台では、締固め時間を必要以上に長くした場合、小型の型

わくを用いた場合、スランブの小さいコンクリートを用いた場合などに、型わく中のコンクリートの不規則な回転移動を生じやすく、一度締固められた組織を乱すことのあることを明らかにした。

- (3) 一般のコンクリート工事ではコンシステンシーの測定にスランブ試験を用いているが、コンクリート製品に用いるような単位水量の少ないかた練りコンクリートでは、配合の差異に敏感でありしかも締固め時間を決定する場合の目安となる振動台式のVBコンシストメーターによるVB試験が最適であり、単位セメント量と単位水量が一定で細骨材率をかえると、VB値が最小になる最適細骨材率( $s/a:\%$ )が存在し、この値は粗骨材の実積率( $A:\%$ )によつてつぎの式で与えられることを見出した。

$$s/a = 117.0 - 1.22A$$

なお、VB試験はゼロスランブの超かた練りコンクリートに対しては、より強力な振動条件の装置にしないと測定が困難になる場合があり、むしろ超かた練りに対しては単位水量や水セメント比の変化に忠実であるCP試験が適当であることを示した。

- (4) 一般の工事用コンクリートでは、配合を修正する場合、スランブ1cm増減するのに、単位水量をおおよそ1.2%増減すればよいとされているが、かた練りコンクリートになるとこの値はいくぶん大きくなることを示した。また、製品用コンクリートのワーカビリティ・コンシステンシーにおよぼす単位水量、単位セメント量、細骨材率、実積率、最大寸法、温度などの諸要因の影響を調べ、最大寸法15～30mm、スランブ2.5～7cmのコンクリートでは、その配合をかえる場合つぎの修正値を提案した。

変 わ る 条 件	碎石コンクリート		川砂利コンクリート	
	単位水量	細骨材率	単位水量	細骨材率
スランブ1cmの増減に対して	±1.2～2.5%	—	±1.0～2.0%	—
細骨材率1%の増減に対して	±0.5～0.7%	—	±0.6～0.8%	—
粗骨材の実積率1%の増減に対して	—	±1.2%	—	±1.2%
粗骨材の最大寸法5mmの増減に対して	±5～7Kg	±3～4%	±5～7Kg	±3～4%
コンクリート温度5℃の増減に対して	±2～3Kg	—	±2～3Kg	—

また、かた練り碎石コンクリートでは川砂利コンクリートと同一スランブをえるのに、岩種や粒形によつて多少こととなるが単位水量を10～20Kg多くする必要のあることを示した。

- (5) 蒸気養生については多くの研究が行なわれているが、研究者によつて見解がかなり相違しているので、使用材料、配合、養生条件などの諸要因を広範囲にかえて総括的な実験研究を行ない、蒸気養生条件や蒸気養生効果が使用セメント、混和材料の種類によつてかなり相違することを指摘した。すなわち、蒸気養生製品用のセメントとしては、 $C_3S/C_2S$ 比が大で粉末度が高く、セツコウ量の多目の早強型のものが適しており、市販セメントの中では早強ポルトランドセメントを用いると養生期間が短縮できしかも脱型時に高強度がえられて有利であること、普通ポルトランドセメントでは最高温度は高目の70～80℃とし、混合セメントあるいは普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで代替した場合には、前養生期間を多少長くし、しかも養生温度は普通ポルトランドセメントの場合と同様に高目にするのがよいことなどを明らかにした。なお、蒸気養生効果を高める混和剤としては良質の促進剤や減水促進剤の使用が有利なことを示したが、塩化物は鉄筋を腐食する心配があるので使用にあつては注意しなければならないこと、AEコンクリートでは前養生期間を多少長くするのが望ましいこと、人工軽量骨材を用いた場合、普通コンクリートと同様に取り扱いえることなども明らかにした。
- (6) 最適蒸気養生条件は、製品の種類と品質、工程などによつてもことなり種々の見解が示されているが、使用材料や配合によつてかなりことなること、成形温度が低いと前養生期間を長くする必要のあること、コンクリートの品質に悪影響を与えないで現在のJIS規格を上回る70～80

℃の最高温度の採用が可能であることなどを明らかにし、1日1サイクルの工程で、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの場合、つぎの蒸気養生条件を適当なものとして提案した。

前養生+温度上昇(上昇速度)+等温養生(最高温度)+冷却期間

$$= 2 \sim 5 + 2 \sim 3 (15 \sim 20 \text{ deg/h}) + 2 \sim 3 (60 \sim 80^\circ\text{C}) + 6 \sim 10 \text{ h}$$

とくに、型わくの回転率をあげるための蒸気養生期間の短縮は超早強ポルトランドセメントの使用により容易になるが、経済性の問題があり、従来の普通および早強ポルトランドセメントを用いて脱型時におおよそ100%の圧縮強度をえるためにはつぎの蒸気養生条件が必要であることを示した。

普通ポルトランドセメントの場合：2+2(30 deg/h)+1(80℃)+2h=7h

早強ポルトランドセメントの場合：1+2(25 deg/h)+1(70℃)+2h=6h

なお、促進剤を添加するとさらに短縮が可能であるが、ごく短時間の養生で高強度をえるには従来より報告されている加圧養生がきわめて効果的であり、一般の型わく養生では、きびしい蒸気養生条件の場合、コンクリートの表面にひびわれを発生する可能性があるので前養生期間と温度上昇速度にとくに配慮が必要であることを指摘した。

- (7) 蒸気養生の際のマチュリチーと脱型時の圧縮強度との間には密接な関係があることが従来より指摘されているが、0℃を基準として両者の関係を求めると1000℃・hまではマチュリチーの増加とともに脱型強度も直線的に増大するが、この値以上になると増進率はごくわずかになること、マチュリチーと強度との関係はセメントの種類によつてかなりことなり標準養生28日強度の50%に相当する脱型強度をえるのに、普通ポルトランドセメントのコンクリートで800~900℃・h、早強ポルトランドセメントの場合550~650℃・hのマチュリチーが必要であることを明らかにした。また、蒸気養生を行なうと長期材令への強度増進率が劣るので、材令7日で標準養生とほぼ同じ値になり、材令28日では標準養生よりおおよそ10~15%低い値になること、促進剤を用いると蒸気養生効果が大きくなりこの低下率が半減されることなどを示した。さらに、曲げ強度、引張強度、付着強度、動弾性係数などの値も蒸気養生によつて初期材令では高くなり、材令28日では標準養生の値より低くなるが、その低下率は圧縮強度の場合より小となること、コンクリートの乾燥収縮の蒸気養生条件によつてことなるが標準養生の場合より10~30%低減されること、蒸気養生によつて凍害抵抗性は劣るといわれているが、後養生で十分に湿潤養生を続けると標準養生の結果と大差なくなることなども明らかにした。

- (8) 超かた練りコンクリートは単位水量がきわめて少ないので一般製品用コンクリートに比べて蒸気養生期間を短かくすることができるが、即時脱型を行なうと型わくによる拘束がないので、少くとも前養生期間を1時間とり、温度上昇速度は20 deg/h程度、最高温度を70℃程度とし、できるだけ徐冷を行なう蒸気養生条件の望ましいこと、超かた練りコンクリートでも十分に締固めを行えば、一般製品用よりすぐれた品質のコンクリートがえられ、とくに乾燥収縮やクリープはかなり低減されることを明らかにした。また、一般に、コンクリートの強度は空げき率と密接な関係のあることが指摘されているが、即時脱型を行なつたコンクリートの強度、はだ面などの品質はその充てん率ともきわめて密接な関係があり、充てん率が1%ますと圧縮強度、曲げ強度とも平均5%程度増加すること、充てん率を高めるためには単位水量は即時脱型できる範囲内で少し多目に、貧配合をさけて単位セメント量は300~350Kgとし、細骨材率は40~45%でしかも空気を連行しない減水剤の使用が効果的であることを明らかにした。とくに、超かた練りコンクリートでは強力な振動締固めが必要になるが、加圧成形を併用すると材令28日の強度は平均26%増加しており、その品質向上にきわめて効果的であることも示した。

なお、以上の研究成果は主として実験室において $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ から $115 \times 15 \times 54 \text{ cm}$ の小型供試体を用いてえられた結果に基づくものであり、コンクリート製品工場における実際の振動締固め製品では、その形状、寸法の大きくなるものも多いので、実際の工程に適用する場合、これらの研究結果を基礎資料としてさらに検討を加える必要があると考える。

## 謝

## 辞

本研究を行なうにあたり、終始、御指導、御鞭撻を賜わった京都大学工学部岡田清教授、ならびに徳島大学工学部荒木謙一教授に深厚なる謝意を表する。

なお、本研究は著者のおおよそ10年間にわたる研究成果を取りまとめたものであり、蒸気養生に関する研究の大半は小野田セメント株式会社在勤中の数年間に行なつたものである。この間、格別の御指導を頂いた小野田セメント株式会社中央研究所田中太郎、浅野忠、山口太郎、各歴代所長高野俊介副所長（現法政大学工学部教授）、森茂二郎次長（現小野田セメント株式会社取締役中央研究所長）、杉木六郎次長（現日本コンクリート工業株式会社取締役研究部長）、ならびにセメント化学に関して適切な御助言を頂いた内川浩主任研究員に深甚の謝意を表する。

また、本研究を進めるにあたり、実験に御協力頂いた徳島大学工学部土木工学教室コンクリート研究室の教職員および学生諸君、ならびに小野田セメント株式会社中央研究所コンクリート研究室の諸氏に深く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) セメント協会；セメントコンクリートNo. 279, p. 66～67 (1970)
- 2) 土木学会, “鉄筋コンクリート工場製品設計施工指針(案)”, (Mar., 1970)
- 3) 土木材料ハンドブック編集委員会編, “土木材料ハンドブック”, p. 207～275 山海堂(Oct., 1968)
- 4) 岡田清；セメント技術年報Ⅱ, p. 228～239 (1949)
- 5) A Joint Committee of the Institute of Civil Engineers of the Institution of Structural Engineers, “The Vibration of Concrete”, (1956)
- 6) Davis, R. D. ; Mag. Conc. Res., Vol. 3, No. 5, p. 71～78 (1951)
- 7) Cusens, A. R. ; Mag. Conc. Res., Vol. 10, No. 29, p. 79～86 (1958)
- 8) Washa, Q. W. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 49, p. 945～952 (1953)
- 9) Green, H. ; Civil Eng. Public Works Rev., Vol. 57, No. 669, p. 467～469, No. 670, p. 632～634 (1962)
- 10) Benett, E. W. and Gokhale, V. G. ; Indian Concrete Journal, Vol. 41, No. 11, p. 421～427 (1967)
- 11) Wadhwa, S. S. and Scirastova, V. G. ; Indian Concrete Journal, Vol. 42, No. 6, p. 249～254 (1968)
- 12) 杉木六郎；セメントコンクリートNo. 251, p. 13～22 (1968)
- 13) 阪本好史；土木学会論文集No. 159 (Nov., 1968)
- 14) 杉木六郎；土木学会論文集No. 88 (Dec., 1968)
- 15) 綾龜一；土木学会論文集No. 71 (Nov., 1962)
- 16) 丸安隆和, 鈴木稔, 平沢彰彦；土木学会論文集No. 84 (Aug., 1962)
- 17) 岡田清, 小林和夫, 岡村為信；セメントコンクリートNo. 261, p. 26～32 (1968)
- 18) 西林新蔵, 吉岡保彦, 千代憲司, 西川勝彦；セメント技術年報XXI, p. 415～419 (1967)
- 19) コンクリートパイルハンドブック編集委員会編, “コンクリートパイルハンドブック”, コンクリートポールパイル協会 (Aug., 1966)
- 20) 杉木六郎；コンクリートジャーナルVol. 4, No. 4, p. 10～21 (1966)
- 21) 永盛峰雄；土木技術資料Vol. 9, No. 7, p. 3～6 (1967)
- 22) Abrams, D. A., “Design of Concrete Mixtures”, Bull. 1, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago (1919)
- 23) ACI Committee 609, Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 56, p. 985～1011 (1960)
- 24) 内山実；鉄道省業務研究資料Vol. 26, No. 25 (1938)
- 25) 藤井光蔵, 鈴木保正, 永高貞治；セメント工業No. 8, p. 1～4, No. 9, p. 1～4, No. 10, p. 1～3 (1938)
- 26) 馬場正巳, “振動コンクリートと振動機”, 土木研究所彙報No. 20 (1942)
- 27) 岡田清；セメント技術年報VI, p. 301～307 (1952)
- 28) 内山実；セメント技術年報Ⅲ, p. 189～192 (1949)
- 29) 日本建設機械化協会, “コンクリートの振動締固め機構に関する研究”, (May, 1960)
- 30) 尾坂芳夫；土木技術Vol. 19, No. 12, p. 51～58 (1964)
- 31) 神山一, 遠藤博之；セメント技術年報XXII, p. 278～290 (1968)
- 32) 神山一, 遠藤博之；材料Vol. 18, No. 187, p. 53～58 (1969)
- 33) 栗山寛；日本建築学会論文集No. 52, p. 1～6 (1956)

- 34) KOLEK, J.; Civil Eng. Public Works Rev., Vol. 54, No. 633, p. 321~325 (1959)
- 35) 近藤泰夫, 坂静雄篇, “コンクリート工学ハンドブック”, p. 209 朝倉書店 (Oct., 1965)
- 36) Bergström, S. G.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 49, p. 893~908 (1953)
- 37) 尾坂芳夫; プレストレストコンクリート Vol. 8, No. 4, p. 56~63 (1966)
- 38) Bergström, S. G.; Mag. Conc. Res., Vol. 4, No. 11, p. 55~62 (1952)
- 39) Wiffin, A. C.; Mag. Conc. Res., Vol. 2, No. 4, p. 39~46 (1950)
- 40) KOLEK, J.; Civil Eng. Public Works Rev., Vol. 54, No. 640, p. 1286~1296 (1959)
- 41) Kirkham, R. H. H.; Mag. Conc. Res., Vol. 1, No. 3, p. 141~143 (1949)
- 42) Kirkham, R. H. H. and Wiffin, A. C.; Mag. Conc. Res., Vol. 3, No. 8, p. 71~91 (1951)
- 43) Crawley, W. O.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 49, p. 909~920 (1953)
- 44) Kaplan, M. F.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 65, p. 808~850 (1960)
- 45) Green, H.; Proc. of the Institution of Civil Engineers, Vol. 22, p. 377~390 (1962)
- 46) Williams, T. E. H.; Mag. Conc. Res., Vol. 4, No. 12, p. 107~112 (1952)
- 47) 河上房義, 後藤幸正, 松本雅一郎; 土木学会誌 Vol. 48, p. 16~23 (1963)
- 48) Plowman, J. M.; Mag. Conc. Res., Vol. 5, No. 15, p. 127~130 (1953)
- 49) Poucher, M. P.; Mag. Conc. Res., Vol. 6, No. 18, p. 139~148 (1954)
- 50) Powers, T. C., “The Properties of Fresh Concrete”, p. 125~135 (1968)
- 51) Stewart, D. A., “The Design and Placing of High Quality Concrete”, (1962)
- 52) 大石建一, 尾林清一, 木下幸一; セメント技術年報 XXIII, p. 375~379 (1969)
- 53) Schumann, J.; Betonstein Zeitung, Jahr. 33, Nr. 12, p. 595~600 (1967)
- 54) 土木学会, “コンクリート標準示方書(昭和42年版)”, p. 349 (May, 1967)
- 55) Meissner, H. S.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 49, p. 885~893 (1953)
- 56) Barcelo, G., “La Vibration du Béton”, (1952)
- 57) Walz, K., “Rüttel Beton”, (1948)
- 58) Higginson, E. C.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 49, p. 1~12 (1952)
- 59) Backstrom, J. E., Burrows, R. W., Mielenz, R. C. and Walkodoff, V. E.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 55, p. 359~375 (1958)
- 60) Heaton, B. S.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 65, p. 846~850 (1968)
- 61) 牧直, 加藤清志, 杉本実; セメント技術年報 XXII, p. 272~277 (1968)
- 62) 荒木謙一, 河野清, 里見洋征; 徳島大学工学部研究報告 No. 13, p. 1~7 (1968)
- 63) Powers, T. C., “The Properties of Fresh Concrete”, p. 464 (1968)
- 64) 明石外世樹, “コンクリートの非破壊試験法”, コンクリートパンフレット No. 36 (Dec., 1954)
- 65) 柳田力; コンクリートジャーナル Vol. 7, No. 9, p. 45~54 (1969)
- 66) 日本コンクリート会 砕石委員会, “コンクリート砕石の品質基準作成に関する調査報告書”, (Mar., 1969)
- 67) 河野清; No. 24 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, p. 7~10 (Sept., 1969)
- 68) 河野清, 水口裕之, 竹村和夫; No. 21 土木学会中国四国支部学術講演概要集, p. 53, 54 (July, 1969)
- 69) 荒木謙一, 河野清, 水口裕之; セメント技術年報 XXIII, p. 357~361 (1969)

- 70) Powers, T. C., "The Properties of Fresh Concrete", p. 134 (1968)
- 71) Powers, T. C., "The Properties of Fresh Concrete", p. 474 (1968)
- 72) セメント協会, "コンクリート専門委員会報告 F-19," (May, 1968)
- 73) 三浦一郎, 杉木六郎; セメントコンクリート No. 117, p. 10~19 (1956)
- 74) 河野清, 大塩明; コンクリートジャーナル Vol. 5, No. 2, p. 19~26 (1967)
- 75) 横道英雄; 材料試験 Vol. 18, No. 69, p. 54~58 (1959)
- 76) 横道英雄, 藤田嘉夫, 松井司; セメント技術年報 XIII, p. 226~230 (1959)
- 77) 横道英雄, 林正道, 田口雅也; セメント技術年報 VII, p. 238~248 (1953)
- 78) 近藤泰夫, 坂静雄篇, "コンクリート工学ハンドブック", p. 353, p. 391 (1965)
- 79) 高野俊介; セメント技術年報 V, p. 363~371 (1951)
- 80) 奥島正一, 小阪義夫; 日本建築学会研究報告 No. 31, p. 39, 40 (1955)
- 81) 国分正胤ほか; コンクリートライブラリー No. 10, p. 1~96 (1964)
- 82) 奥島正一ほか; 材料 Vol. 15, No. 157, p. 1~102 (1966)
- 83) 国分正胤ほか; コンクリートジャーナル Vol. 4, No. 12, p. 1~79 (1966)
- 84) 村田二郎ほか; コンクリートジャーナル Vol. 5, No. 3, p. 1~97 (1967)
- 85) 竹村豊ほか; セメントコンクリート No. 259, p. 5~139 (1968)
- 86) 小阪義夫ほか; 材料 Vol. 18, No. 185, p. 2~142 (1969)
- 87) 村田二郎, 菅原操, 宮崎昭二, "高強度人工軽量骨材コンクリート", 山海堂 (May, 1966)
- 88) 軽量骨材ハンドブック編集委員会, "軽量骨材コンクリートハンドブック", 日刊工業新聞社 (June, 1969)
- 89) 岡田清監修, 西林新蔵, 千葉静男編著, "人工軽量骨材コンクリート", 朝倉書店 (Aug, 1969)
- 90) 土木学会コンクリート委員会; 第2回構造用軽量骨材に関するシンポジウム講演概要集, p. 1~53 (Apr., 1969)
- 91) 河野清; コンクリート製品 No. 166, p. 3~13 (1967)
- 92) 土木学会, "人工軽量骨材コンクリート設計施工指針(条)", p. 27~36 (May, 1966)
- 93) 高橋克男, 菅原操; プレストレストコンクリート Vol. 6, No. 3, p. 22~35 (1964)
- 94) 菅原操; コンクリートライブラリー No. 10, p. 46~51 (May., 1964)
- 95) 杉木六郎, 大石建一, 尾崎義典; 日本 A C I 構造用軽量コンクリートシンポジウム論文集, p. 51~54 (Nov., 1964)
- 96) 堺毅, 竹内十三男, 上野秋朗; No. 21 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV-69 (May, 1966), No. 22 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV-20 (May, 1967)
- 97) 島田専右, 森永繁, 成田一徳; 材料 Vol. 15, No. 157, p. 94~100 (1966)
- 98) 河野清; 材料 Vol. 18, No. 185, p. 59~65 (1969)
- 99) 荒木謙一, 河野清, 伊賀俊昭; No. 23 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, p. 47~50 (Oct., 1968)
- 100) 河野清, 荒木謙一; コンクリートジャーナル Vol. 8, No. 4, p. 1~14 (1970)
- 101) Powers, T. C., "The Properties of Fresh Concrete", p. 467 (1968)
- 102) Jones, T. R. and Stephenson, H. K.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 54, p. 527~535 (1957)
- 103) 今井宏典, 吉原克郎, 河野富夫; セメントコンクリート No. 229, p. 14~23 (1966)
- 104) 西沢紀昭, 奥島正一, 岸谷孝一, 山崎寛司; コンクリートジャーナル Vol. 4, No. 12, p. 20~36 (1966)
- 105) 奥島正一, 小阪義夫; 材料 Vol. 15, No. 157, p. 691~698 (1966)
- 106) 西沢紀昭; コンクリートライブラリー No. 10, p. 29~33 (May, 1964)
- 107) 西岡忠郎, 江田勇, 国本公端; セメント技術年報 XVII, p. 478~486 (1964)



- 108) 奥島正一, 小阪義夫, 大井孝和; セメント技術年報XVII, p. 460~463 (1965)
- 109) 関慎吾, 笠原清, 栗山武信, 河原誠; 技術研究所報告No. 66056, 電力中央研究所技術研究所 (Dec., 1966)
- 110) 国分正胤; コンクリートライブラリーNo. 10, p. 1~13 (May, 1964)
- 111) 六車熙, 深田隆俊; セメント技術年報XX, p. 431~436 (1965)
- 112) 西林新蔵; 材料Vol. 15, No. 13, p. 2~9 (1966)
- 113) 西林新蔵, 小林和夫, 小野紘一; セメント技術年報XX, p. 464~471 (1965)
- 114) Shideler, J. J.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 54, p. 299~328 (1957)
- 115) 建設省建築研究所第2研究部, "ライオナイトを使用したコンクリートの性能試験報告書", (Mar., 1964)
- 116) 奥島正一, 小阪義夫, 大井孝和; プレストレストコンクリートVol. 6, No. 3, p. 36~41 (1964)
- 117) 西岡思郎; セメント技術年報XX, p. 504~510 (1966)
- 118) 丸安隆和, 小林一輔, 伊藤利治; コンクリートライブラリーNo. 10, p. 25~28 (May, 1964)
- 119) 西岡思郎, 国本公端; セメント技術年報XVII, p. 256~268 (1963)
- 120) Klieger, P. and Hanson, J. A.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 57, p. 779~796 (1961)
- 121) 西林新蔵; 土木学会論文集No. 146, p. 47~55 (Oct., 1967)
- 122) 江藤哲夫; コンクリートジャーナルVol. 4, No. 5, p. 26~32 (1966)
- 123) 荒木謙一, 河野清, 水口裕之, No. 22 土木学会中国四国支部学術講演概要集, p. 96~99 (July, 1970)
- 124) Gonnerman, H. F.; Proc. ASTM, Vol. 25, Part 1, p. 237~249 (1925)
- 125) Lyse, I. and Johansen, R.; RILEM Bulletin No. 14 (1962)
- 126) 杉木六郎, 荅上裕之, 藤井敏郎; セメントコンクリートNo. 194, p. 2~7 (1963)
- 127) 笠井芳夫; 日本建築学会論文報告集No. 100, p. 1~10 (1964)
- 128) 奥島正一, 小阪義夫; セメント技術年報XVII, p. 268~272 (1964)
- 129) 日本セメント技術協会コンクリート委員会; セメント技術年報XVII, p. 235~238 (1964)
- 130) 北田勇輔, 木内晃, 田口雅也; セメント技術年報XVII, p. 313~318 (1964)
- 131) セメント協会コンクリート専門委員会; セメントコンクリートNo. 264, p. 2~9 (1969)
- 132) 日本セメント技術協会, "コンクリート専門委員会報告F-6", (May, 1965)
- 133) 山本実, 相沢龜之助, 伊福部宗夫; セメントコンクリートNo. 251, p. 23~29 (1968), No. 252, p. 22~27 (1968)
- 134) 木村恵雄, 坊所勝弥; セメント技術年報XVII, p. 352~358 (1963), XVII, p. 377~380 (1964), XX, p. 318~322 (1966)
- 135) 木村恵雄, 野崎貞澄; セメント技術年報XXIII, p. 370~374 (1969)
- 136) 石神武男; セメント技術年報XIII, p. 230~236 (1959)
- 137) 岩崎岩雄, 原田豊, 吉田迪雄; セメントコンクリートNo. 182, p. 2~8 (1962)
- 138) 荒木謙一, 河野清, 林岑生; セメント技術年報XXIII, p. 362~369 (1969)
- 139) 吉田徳次郎; 土木学会誌Vol. 26, No. 11, p. 103~115 (1940)
- 140) Erntroy, H. C. and Shacklock, B. W., "Proc. of a Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete," p. 55~73 (London, 1954)
- 141) 土木学会, "コンクリート標準示方書(昭和42年版)" p. 19 (May, 1967)
- 142) Powers, T. C., "The Properties of Fresh Concrete", p. 443 (1968)
- 143) 国分正胤編, "土木材料実験", p. 115~124, p. 302~307 技報堂 (Jan., 1969)
- 144) 吉田徳次郎, "コンクリートおよび鉄筋コンクリートの施工方法", p. 186~193 丸善 (Feb., 1956)

- 145) Powers, T. C., "The Properties of Fresh Concrete", p. 443 (1968)
- 146) 岡田清, 明石外世樹, 神山一, 児玉武三, "土木材料学", p. 180~185 国民科学社 (Mar., 1965)
- 147) 土木学会, "コンクリート標準示方書(昭和42年版)", p. 195, 196 (May, 1967)
- 148) Cusens, A. R.; Mag. Conc. Res., Vol. 8, No. 22, p. 23~30 (1956)
- 149) A C I Committee 211; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 61, p. 1~21 (1965)
- 150) 岡田清; セメントコンクリート No. 112, p. 29~35 (1956)
- 151) Wuerpel, C. E.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 40, p. 70~75 (1943)
- 152) Granville, W. H.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 33, p. 319~326 (1937)
- 153) 近藤泰夫訳, "コンクリートマニュアル", p. 106 国民科学社 (July, 1956)
- 154) 吉田徳次郎, "コンクリートおよび鉄筋コンクリートの施工方法", p. 218 (Feb., 1956)
- 155) 日本材料学会, "コンクリート用化学混和剤", p. 77~97 (Aug., 1969)
- 156) 国分正胤; セメントコンクリート No. 267, p. 2~18 (1969)
- 157) 山崎寛司; 土木学会論文集 No. 84, p. 98~118 (Aug., 1962), No. 85, p. 15~44 (Sept., 1962)
- 158) 伊東茂富, 磯崎正晴, 養王田英一; セメントコンクリート No. 183, p. 21~27 (1962)
- 159) 西林新蔵, 児島孝之, 松本忠夫; セメントコンクリート No. 267, p. 2~18 (1969)
- 160) Powers, T. C.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 28, p. 419~448 (1932)
- 161) 荒木謙一; プレストレストコンクリート Vol. 2, No. 6, p. 16~21 (1960)
- 162) 土木学会, "コンクリート標準示方書(昭和42年)" p. 303 (May, 1967)
- 163) 岡田清, 明石外世樹, 神山一, 児玉武三, "土木材料学", p. 163 (May, 1963)
- 164) Kaplan, M. F.; Mag. Conc. Res., Vol. 10, No. 29, p. 63~74 (1958)
- 165) 児玉武三; No. 24 土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅳ, p. 35, 36 (Sept., 1969)
- 166) 山本泰彦; コンクリートジャーナル Vol. 7, No. 11, p. 11~21 (1969)
- 167) 吉田徳次郎, "コンクリートおよび鉄筋コンクリートの施工方法", p. 177 (Feb., 1956)
- 168) 山本泰彦; No. 23 土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅳ, p. 3~6 (Oct., 1968)
- 169) 日本材料学会, "コンクリート用化学混和剤", p. 68 (Aug., 1969)
- 170) Gonnerman, H. F.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 40, p. 477~507 (1944)
- 171) 河野清, 梶野洋, 木下幸一; 小野田研究報告 Vol. 19, p. 138~144 (1967)
- 172) 荒木謙一, 河野清, 水口裕之; セメント技術年報XXV, p. 283~241 (1970)
- 173) 渡辺昇; セメントコンクリート No. 172, p. 8~11 (1961)
- 174) 河野清, 戸川一夫, 林岑生, 竹村和夫; No. 22 土木学会中国四国支部学術講演概要集, p. 94, 95 (July, 1970)
- 175) 龜田泰弘, 篠沢清見; セメントコンクリート No. 159, p. 2~7 (1960)
- 176) 近藤泰夫, 坂静雄篇, "コンクリート工学ハンドブック", p. 240 (Oct., 1965)
- 177) 樋口芳朗, 村田二郎, 小林春夫, "コンクリート工学(I)施工", p. 115 彰国社 (May, 1968)
- 178) 吉田徳次郎, "コンクリートおよび鉄筋コンクリートの施工方法", p. 215 (Feb., 1956)
- 179) 荒木謙一, 河野清, 竹村和夫; No. 22 土木学会中国四国支部学術講演概要集, p. 100~103 (July, 1970)
- 180) Walker, S., Bloem, D. L. and Gaynor, R. D.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 57, p. 283~298 (1960)
- 181) A C I Committee 517; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 60, p. 953~986 (1963)
- 182) Reinsdorf, Z.; General Report of RILEM Symposium, Session - II (Moscow, 1964)
- 183) 河野清; コンクリートジャーナル, Vol. 4, No. 3, p. 22~28 (1966)

- 184) Butt, Y. M., Kolbasov, V. M. and Timashev, V. V. ; Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III, "Properties of Cement Paste and Concrete" Principal Paper (P. P.) III-46, p. 437~471 (Tokyo, 1968)
- 185) 河野清 ; コンクリート製品 No. 191, p. 10~17 (1969)
- 186) 樋口芳朗 ; セメントコンクリート No. 271, p. 98~107 (1969)
- 187) A C I Committee 517 ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 66, p. 629~646 (1969)
- 188) Nurse, R. W. ; General Report of RILEM Symposium, Session-I (Moscow, 1964)
- 189) Idorn, G. M. ; Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III, Principal Paper III-4a, p. 411~428 (Tokyo, 1968)
- 190) 河野清, 尾崎義典, 遠藤康夫 ; 小野田研究報告 Vol. 18, p. 74~79 (1966)
- 191) Reinsdorf, Z. ; Report of RILEM Symposium, II-8 (Moscow, 1964)
- 192) Keiser, L. A. ; Report of RILEM Symposium, I-12 (Moscow, 1964)
- 193) Sheikin, A. E., and Oleinikova, N. I., Report of RILEM Symposium, I-17 (Moscow, 1964)
- 194) Mironov, S. A. ; Bulletin RILEM No. 30, p. 87~92 (1966)
- 195) 平野生三郎, 山崎寛司 ; セメント技術年報 IV, p. 282~287 (1954)
- 196) 松井嘉孝, 笠井芳夫, 横山清, 平賀友晃 ; 日本建築学会論文報告集 No. 103, p. 38 (1964)
- 197) Mironov, S. A. ; Report of RILEM Symposium, II-16 (Moscow, 1964)
- 198) 児玉武三, 鶴飼光夫 ; No. 22 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, p. 95-1~4 (May, 1967)
- 199) Royak, S. M., Cherkasova, A. F. and Jashina, E. T. ; Report of RILEM Symposium, II-17 (Moscow, 1964)
- 200) 高島三郎, 嶋谷宏文 ; セメント技術年報 XXII, p. 315~318 (1968)
- 201) Nurse, R. W. ; Mag. Conc. Res., Vol. 1, No. 2, p. 79~88 (1949)
- 202) Martin, H. ; Betonstein Zeitung, Jahr. 34, Nr. 1, p. 11~15 (1968)
- 203) Hanson, J. A. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 62, p. 661~670 (1965)
- 204) 長野蘭蔵, 西原豊, 下原貴志 ; セメント技術年報 XIX, p. 489~494 (1965)
- 205) 龜田泰弘, 篠沢和久, 福士勲, "混合セメント用法研究委員会報告", p. 71~124 (June, 1965)
- 206) Stolnikov, V. V. and Kind, V. V. ; Report of RILEM Symposium, II-21 (Moscow, 1964)
- 207) Balazs, Dy and Tamas, F. ; Report of RILEM Symposium, I-1 (Moscow, 1964)
- 208) Balazs, Dy. ; Report of RILEM Symposium, II-4 (Moscow, 1964)
- 209) Günter, F. ; Report of RILEM Symposium, I-2 (Moscow, 1964)
- 210) Klieger, P. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 54, p. 1063~1081 (1958)
- 211) Ayapov, U. A. ; Report of RILEM Symposium, I-5 (Moscow, 1964)
- 212) Sivertsev, G. N. and Lapshina, A. I. ; Report of RILEM Symposium, I-18 (Moscow, 1964)
- 213) Butt, Y. M., Timashov, V. V. and Lukatzkaya, L. A. ; Report of RILEM Symposium, I-8 (Moscow, 1964)
- 214) 杉木六郎 ; セメントコンクリート No. 148, p. 19~26 (1959)
- 215) 児玉和巳, 福馬直昭, 御所窪邦男 ; セメント技術年報 XXIII, p. 382~387 (1969)
- 216) Goryainov, G. E. and Vebsler, E. G. ; Report of RILEM Symposium,

I - 10 (Moscow, 1964)

- 217) Soroker, V. I. ; Report of RILEM Symposium, II - 20 (Moscow, 1964)
- 218) Hanson, J. A. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 60, p. 75~100 (1965)
- 219) Merritt, R. R. and Johnson, J. W. ; Highway Research Board, Bull. 355, p. 1~26 (1962)
- 220) Nurse, R. W. and Whitaker, T. ; Report of RILEM Symposium, II - 3 (Moscow, 1964)
- 221) Shideler, J. J. and Chamberlin, W. H. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 46, p. 273~283 (1949)
- 222) Teramoto, H. and Kawada, N. ; Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III, Supplementary Paper (S. P.), III - 91, p. 477~485 (Tokyo, 1968)
- 223) Fedorov, V. A. ; Report of RILEM Symposium, II - 11 (Moscow, 1964)
- 224) Saul, A. G. A. ; Mag. Conc. Res., Vol. 2, No. 6, p. 127~140 (1951)
- 225) Karapchansky, N. and Pejev, A. ; Report of RILEM Symposium, II - 6 (Moscow, 1968)
- 226) Lewis, R. K. ; Report of RILEM Symposium, II - 1 (Moscow, 1964)
- 227) 篠沢和久 ; セメント技術年報 XXI, p. 311~314 (1962)
- 228) 日本プレスコンクリート工業株式会社, "試験研究報告書", p. 5~7 (May, 1960)
- 229) Keiser, L. A., Marjamov, N. B. and Panfilova, L. I. ; Report of RILEM Symposium, II - 14 (Moscow, 1964)
- 230) 高野俊介 ; 土木論文集 No. 26 (May, 1955)
- 231) Klieger, P. ; Research Development Bull. 103, Research and Development Laboratories, PCA (1958)
- 232) 横道英雄, 林正道, 松井司 ; セメント技術年報 XI, p. 332~335 (1957)
- 233) Berkovitch, T. M. and Kheiker, D. M. ; Report of RILEM Symposium, I - 6 (Moscow, 1964)
- 234) Chamberlin, W. H., Brewer, H. W. and Shideler, J. J. ; Report C-621, Concrete Laboratories, U. S. Bureau of Reclamation (Aug., 1952)
- 235) Higginson, E. C. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 58, p. 281~298 (1961)
- 236) 河野清, "ソ連欧州のセメント2次製品工場", コンクリート技術情報 No. 15, 小野田セメントKK中央研究所 (Jan., 1965)
- 237) 篠沢和久 ; 日本建築学会論文報告集 No. 125, p. 32~37 (1966)
- 238) 向井毅 ; 日本建築学会論文報告集 No. 119, p. 1~9 (1961), No. 120, p. 1~7 (1961)
- 239) Mironov, S. A. and Malinina, L. A. ; Stroiidat, Moscow (1964)
- 240) 郡道夫, 井上肇 ; セメント技術年報 XIV, p. 309~311 (1959)
- 241) Plowman, J. M. ; Mag. Conc. Res., Vol. 8, No. 22, p. 13~22 (1956)
- 242) 渡辺喜一郎 ; セメントコンクリート No. 147, p. 27~28 (1959)
- 243) 岩崎岩雄, 原田豊, 吉田迎雄 ; セメントコンクリート No. 182, p. 2~7 (1962)
- 244) Kuennig, W. H. and Carlson, C. C. ; Development Department Bull. D13, Research and Development Laboratories, PCA (1956)
- 245) Saul, A. G. A., "Proc. of a Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete", p. 132~142 (London, 1954)
- 246) Bergström, S. G. ; Mag. Conc. Res., Vol. 4, No. 14, p. 61~66 (1953)
- 247) Marosszeki, N. ; Zement-Kalk-Gips, Nr. 9, p. 363~368 (1957)

- 248) Shchekanenko, R. A.; Report of RILEM Symposium, II - 22 (Moscow, 1964)
- 249) Seaman, J. C., Warren, G. and Washa, G. A.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 51, p. 833~852 (1955)
- 250) Kolner, V. M., Kholmyanskyi, M. M. and Serova, L. P.; Report of RILEM Symposium, II - 15 (Moscow, 1964)
- 251) Pauw, A.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 57, p. 679~688 (1960)
- 252) Nepper-Christensen, P. and Skovgaard, P.; Report of RILEM Symposium, II - 2 (Moscow, 1964)
- 253) Pfeiffer, H. and Hilsdorf, H.; Betonstein Zeitung, Jahr. 35, Nr. 8 p. 481~490 (1970)
- 254) Skramtaev, B. G., Gorchakov, G. I. and Kapkin, M. M.; Report of RILEM Symposium, II - 19 (Moscow, 1964)
- 255) Klieger, P.; Research and Development Laboratories of PCA, Bull. 118, p. 2~12 (Nov., 1960)
- 256) 大石建一, 尾崎義典, 遠藤康夫; セメントコンクリート No. 226, p. 15~20 (1965)
- 257) Gorshkov, A. M.; Report of RILEM Symposium, II - 13 (Moscow, 1964)
- 258) Jarocki, W. and Talbierski, J.; Report of RILEM Symposium, II - 5 (Moscow, 1964)
- 259) Semenov, L. A., Podurovsky, N. I. and Volkovsky, N. N.; Report of RILEM Symposium, II - 18 (Moscow, 1964)
- 260) Balatjev, P. C. and Sokolov, V. A.; Report of RILEM Symposium, II - 9 (July, 1964)
- 261) 市岡栄; セメントコンクリート No. 126, p. 19~23 (1957)
- 262) 日本材料学会, "コンクリート用化学混和剤", p. 163~169 (Aug., 1969)
- 263) 新材料新工法委員会; コンクリートジャーナル Vol. 8, No. 5, p. 91~106 (1970)
- 264) 土岐高史, 谷出直義, 両角昌弘, 植田実; セメントコンクリート No. 282, p. 2~9 (1970)
- 265) Bogue, R. H., "The Chemistry of Portland Cement", 2nd Edition (1955)
- 266) 窯業協会編, "窯業工学ハンドブック", p. 1626~1653 技報堂 (Dec., 1966)
- 267) 竹本国博, "ポルトランドセメントの凝結硬化におけるセッコウの役割," 東京大学学位論文 (1960)
- 268) 内川浩, "フリット相に関連したセメントの工業化学的研究", 東京大学学位論文 (1963)
- 269) 竹本国博, 内川浩; セメントコンクリート No. 271, p. 13~27 (1969)
- 270) Guinier, A. and Regourd, M. et al.; Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part I, "Chemistry of Cement Clinker", (Tokyo, 1968)
- 271) Taylor, H. F. W. et al.; Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part II, "Hydration of Cement", (Tokyo, 1968)
- 272) 近藤泰夫, 坂静雄編, "コンクリート工学ハンドブック", p. 5 (Oct., 1957)
- 273) 竹本国博; セメント技術年報 VII, p. 19~27 (1953)
- 274) Copeland, L. E., Kantro, D. L. and Verbeck, G.; Proc. of the 4th International Symposium on the Chemistry of Cement, Session IV - 4 (Washington, 1963)
- 275) Kaempfe, F.; Zement, Jahr. 24, p. 257 (1935)

- 276) 山内俊吉, 毛利純一; セメント技術年報Ⅳ, p. 103~109 (1950), VI, p. 45~48 (1952)
- 277) 田中太郎, 竹本国博; セメント技術年報Ⅳ, p. 119~128 (1950), V, p. 162~172 (1951), VI, p. 49~67 (1952), VII, p. 75~83 (1953), VIII, p. 148~155 (1954)
- 278) Turriziani, R. and Schippa, G.; *Tec. Sci.*, Vol. 24, p. 366 (1954)
- 279) 爾見軍治; セメント技術年報Ⅹ, p. 221~227 (1956)
- 280) Guillaume, L.; *Silicate Industrie*, Vol. 28, No. 6, p. 297~300 (1963)
- 281) 国分正胤; セメントコンクリート No. 267, p. 2~18 (1969)
- 282) Le Chatelier, H.; *Compt. Rend.*, Vol. 94, p. 13 (1882)
- 283) Michaelis, W.; *Chem. Ztg.*, Vol. 17, p. 982 (1883)
- 284) 近藤実; セメント技術年報ⅩⅢ, p. 130~137 (1959)
- 285) Bogue, R. H.; *International Congress on the Applied Chemistry at Brussels* (1954)
- 286) 内川浩; セラミックス Vol. 3, No. 3, p. 159~170 (1968)
- 287) Ono, Y., Kawamura, S. and Soda, Y.; *Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part I*, S. P. I-79, p. 275~284 (Tokyo, 1968)
- 288) 窯業協会篇, "窯業工学ハンドブック", p. 1667 (1966)
- 289) 高林利秋; No. 21 土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅳ-10, p. 10 (May, 1966)
- 290) 河野清; 小野田研究報告 Vol. 17, p. 53~74 (1965)
- 291) Hansen, W. C.; *Proc. Am. Conc. Inst.*, Vol. 49, p. 841~855 (1953)
- 292) Kalousek, G. L. and Adams, M.; *Proc. Am. Conc. Inst.*, Vol. 48, p. 77~90 (1952)
- 293) Budnikov, P. P., Royak, S. M., Malinina, Ju. S. and Mayants, M. M.; *Report of RILEM Symposium*, I-7 (Julix, 1964)
- 294) Hansen, P. F., Jessing, J., Mønsted, K. and Trudsø, E.; *Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III*, S. P. III-108, p. 503~520 (Tokyo, 1968)
- 295) Verbeck, G.; *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, Bull. 189, p. 57~63 (1965)
- 296) 松田応作, 石村進; セメント技術年報Ⅺ, p. 112~117 (1957)
- 297) 河野清, 大塩明, 江村建三, 木下幸一; セメントコンクリート No. 236, p. 21~27 (1966), セメント技術年報ⅩⅩ, p. 453~459 (1966)
- 298) 河野清, 江村建三, 木下幸一; 小野田研究報告 Vol. 16, p. 206~215 (1965), *Proc. 9th JCTM*, p. 122~124 (1966)
- 299) 河野清, 大塩明; コンクリートジャーナル Vol. 5, No. 2, p. 19~26 (1965)
- 300) 日本セメント技術協会, "収縮委員会報告 H-1", (June, 1962)
- 301) Neville, A. M.; *Mag. Conc. Res.*, Vol. 3, No. 9, p. 9~12 (1957)
- 302) 塚山隆一; セメントコンクリート No. 271, p. 76~82 (1969)
- 303) 河野清, 江村建三, 木下幸一; 小野田研究報告 Vol. 17, p. 275~289 (1966), *Proc. 9th JCTM*, p. 117~121 (1966)
- 304) 河野清, 武山信, 田中稲英; コンクリート製品 No. 176, p. 9~15 (1968)
- 305) 丸安隆和, 小林一輔, 阪本好史; 東京大学生産技術研究所報告 Vol. 15, No. 4 (Feb., 1966)
- 306) 武山信, "高炉セメントに関する文献集", コンクリート技術情報 No. 19, 小野田セメント K K 中央研

1966)

- 307) 後藤一夫, 小松原正夫, 佐藤寛一; セメント技術年報XVI, p.420~425 (1962)
- 308) 鈴木節三; 小野田研究報告Vol. 10, p.159~169 (1958)
- 309) 吉越盛次; 土木学会論文集No.31, p.1~62 (Nov., 1960)
- 310) 山崎寛司; 土木学会論文集No.84, p.98~118 (Aug., 1962), No.85, p.15~44 (Sept., 1962)
- 311) 土木学会フライアッシュ小委員会; 土木学会論文集No.68別冊(May, 1960)
- 312) 高橋秀夫, 小関征三, 竹内昭年, 清水俊彦, "フライアッシュセメントに関する文献集", コンクリート技術情報No.18, 小野田セメントKK中央研究所(Sept., 1965)
- 313) 佐々木滋郎, 加藤五郎; セメントコンクリートNo.166, p.37~41 (1960)
- 314) 村田二郎; 土木学会論文集No.77 (Nov., 1961)
- 315) 近藤連一; コンクリートジャーナルVol. 6, No.12, p.4~8 (1968)
- 316) 塚山隆一; コンクリートジャーナルVol. 6, No.12, p.35~38 (1968)
- 317) 河野清, 波木守; 小野田研究報告Vol. 17, p.24~40 (1965)
- 318) Powers, T. C., "The Properties of Fresh Concrete", p.555~557 (1968)
- 319) 宮沢清; セメントコンクリートNo.254, p.12~16, No.255, p.22~26 (1968)
- 320) 鈴木節三; コンクリートジャーナルVol. 8, No.4, p.78~79 (1970)
- 321) 長滝重義; コンクリートジャーナルVol. 6, No.12, p.48~54 (1968)
- 322) 目黒顯晴, 水野義久, 金井国重, 高橋肇, 土岐高史, 河野清, 植田実, 大塩明, 尾崎義典, 遠藤康夫, 原田理一; セメント技術年報XXI, p.545~550 (1967)
- 323) 武山信, 田中稲英, 大塩明, "各種市販混和材料一覧表", コンクリート技術情報No.20, 小野田セメントKK中央研究所(July, 1967)
- 324) 仕入豊和, 重倉祐光, "コンクリート混和材料", 技術書院(July, 1966)
- 325) 日本材料学会, "コンクリート用化学混和剤", p.163~169 (Aug., 1969)
- 326) 河野清, 江村建三, 木下幸一; セメントコンクリートNo.213, p.25~30 (1964), セメント技術年報XVIII, p.250~255 (1964)
- 327) 柳川晃夫; 小野田研究報告Vol. 8, p.62~69 (1959)
- 328) 山田順治, 磯崎正晴, "A E コンクリートの性質と施工", 理工図書(June, 1955)
- 329) 杉木六郎, 河野清, 渋谷喜一; 小野田研究報告Vol. 14, p.23~36 (1962), Proc. 5th JCTM, p.131~135 (1962)
- 330) 河野清, 江村建三, 木下幸一; 小野田研究報告Vol. 15, p.217~226 (1963), Proc. 7th JCTM, p.120~121 (1964)
- 331) Rosenberg, A. M.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 61, p.1261~1269 (1964)
- 332) United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, "Concrete Manual", 6th Edition p.64, 65 (1956); 近藤泰夫訳, "コンクリートマニュアル" p.59 (July, 1957)
- 333) 樋口二郎, 村田二郎, 小林春夫, "コンクリート工学(Ⅰ)施工", p.42 (May, 1968)
- 334) Shideler, J. J.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 48, p.537~559 (1952)
- 335) 松田応作, 工藤矩弘, 土屋喜代雄, 高橋秀雄; 小野田研究報告Vol. 18, p.86~96 (1966)
- 336) Ratinov, V. B., Rozenberg, T. I. and Smirnova, I. A.; Report of RILEM Symposium, 1-16 (Moscow, 1964)
- 337) Monfore, G. E. and Verbeck, G. J.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 57, p.491~516 (1960)

- 338) 浜田稔；セメントコンクリートNo.272, p.2～18(1969)
- 339) 田中義人；プレストレストコンクリートVol.10, No.4, p.8～15(1968)
- 340) 近藤泰夫, 武田昭彦, 秀島節治；土木学会誌Vol.13, No.2, p.1～9(1958)
- 341) Moskvín, V. M. and Alekseev, S. N. ; Beton i Zhelezobeton No.2, p.1～9(1958)
- 342) 松田応作, 工藤矩弘, 土居喜代雄；小野田研究報告Vol.18, p.123～132(1966)
- 343) Blenkinsop, J. C. ; Mag. Conc. Res., Vol.18, No.43, p.33～38(1963)
- 344) 一家惟俊, 関宮博史, 中村貞夫；小野田研究報告Vol.18, p.133～144(1966)
- 345) 新材料新工法委員会；コンクリートジャーナルVol.6, No.6, p.89～94(1968)
- 346) 小野吉三；コンクリート製品, No.189, p.5～13(1969)
- 347) 斉藤鶴義, 一家惟俊, 石川巖；小野田研究報告Vol.20, p.54～61(1968)
- 348) 国分正胤, 三村通精, 上野勇, 細谷浩正, “ベーストによるフライアッシュの使用に関する研究”, コンクリートライブラリーNo.4, 土木学会(Mar., 1963)
- 349) Withey, N. H. “Use of Fly Ash in Block Mixes”, Technical Report No.56, National Concrete Masonry Association(1956)
- 350) 河野清, 武山信, 大塩明；セメントコンクリートNo.233, p.19～23(1967)
- 351) Seligmann, P. and Greening, N. R. ; Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part II, P. P. II-3, p.179～199(Tokyo, 1968)
- 352) Menzel, C. A. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol.31, p.125～148(1934)
- 353) Kalousek, G. L. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol.63, p.817～833(1966)
- 354) ACI Committee 212 ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol.60, p.1481～1524(Nov., 1963)
- 355) 工藤矩弘；小野田研究報告Vol.17, p.236～243(1965)
- 356) 阿久津兼二；建材Vol.17, No.11, p.35～38(1966)
- 357) 大浜嘉彦；建材Vol.17, No.11, p.40～45(1966)
- 358) US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, “Concrete Manual”, 6th Edition p.34(1956)
- 359) 荒木謙一, 河野清；セメント技術年報XXII, p.417～422(1968)
- 360) 土木学会, “人工軽量骨材コンクリート設計施工指針(案)”, (Aug., 1966)
- 361) 河野清；コンクリート製品No.166, p.3～13(1967)
- 362) 土木材料ハンドブック編集委員会, “土木材料ハンドブック”, p.215山海堂(Oct., 1968)
- 363) Kohno, K., Oshio, A., Emura, K. and Kinoshita, K. ; Proc. 10th JCTM, p.119～121(1967)
- 364) 土木学会, “コンクリート標準示方書(昭和42年)”, p.21(May, 1967)
- 365) セメント技術協会；コンクリート委員会報告F-14 (June, 1964), F-15 (June, 1965), F-16 (June, 1966)
- 366) ACI Committee 211；Proc. Am. Conc. Inst., Vol.62, p.1～21(1965)
- 367) Abrams, D. A. et al. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol.53, p.230～231(1956)
- 368) 横道英雄；プレストレストコンクリートVol.3, No.2, p.22～27(1961)
- 369) 加圧コンクリート矢板技術協会；セメントコンクリートNo.271, p.128～132(1959)
- 370) 高林利秋, “真空コンクリート工法”, p.11理工図書(Aug., 1962)
- 371) 斉藤鶴義, 原田理一, 藤井敏郎, 川神俊太郎, 西村洋；セメント技術年報XXIV, p.264～267(1970)
- 372) 熊坂英治；セメントコンクリートNo.280, p.51～56(1970)



- 373) 河野清, 波木守; 小野田研究報告 Vol. 17, p.100~111 (1965)
- 374) 河野清; コンクリート製品 No. 211, p.5~8 (1970)
- 375) 河野清, 江村建三, 木下幸一; セメント技術年報 XX, p.407~411 (1965)
- 376) 日本セメント技術協会コンクリート委員会; セメントコンクリート No. 216, p.2~9 (1964)
- 377) 高野俊介, 渡辺嘉香, 河野清; セメント技術年報 XXI, p.181~186 (1958)
- 378) 渡辺嘉香, 河野清, 小林辰男; 小野田研究報告 Vol. 11, p.267~274 (1959)
- 379) 吉田徳次郎, "コンクリートおよび鉄筋コンクリートの施工方法", p.528 (1956)
- 380) Troxell, C. E., Davis, H. E. and Kelly, J. W., "Composition and Properties of Concrete", P254, 255 (1968)
- 381) 堀素夫, "セメントおよびコンクリートの破壊現象に関する確率論的研究", 東京大学学位論文 (Feb., 1961)
- 382) 河野清, 江村建三, 木下幸一; 小野田研究報告 Vol. 16, p.237~248 (1964)
- 383) 河野清, 渋谷喜一, 江村建三; セメント技術年報 XVI, p.290~295 (1962), セメントコンクリート No. 187, p.8~13 (1962)
- 384) 国分正胤, 岡村甫, "No. 2 異形鉄筋シンポジウム", コンクリートライブラリー No. 14, p.1~19 (Dec., 1965)
- 385) 杉木六郎, 河野清; コンクリートライブラリー No. 14, p.70~75 (Dec., 1965)
- 386) 河野清, 江村建三, 木下幸一; 小野田研究報告 Vol. 16, p.93~106 (1964)
- 387) 河野清, 大塩明, 江村建三, 木下幸一; No. 22 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, p.94-1~4 (May, 1967)
- 388) 波木守; 小野田研究報告 Vol. 16, p.37~44 (1964)
- 389) 杉木六郎; セメントコンクリート No. 165, p.27~28 (1960)
- 390) 波木守, 木内晃, 大塩明; 小野田研究報告 Vol. 15, p.9~25, p.176~186, p.227~232 (1963), Vol. 16, p.9~15, p.107~116, p.249~261 (1964)
- 391) 波木守, 木内晃, 大塩明; セメントコンクリート No. 202, p.20~24 (1963)
- 392) Kohno, K., Oshio, A., Emura, K. and Kinoshita, K.; Proc. 10th JCTM, p.122~124 (1967)
- 393) Lyse, I.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 56, p.775~782 (1960)
- 394) 細井潤三; 窯業協会誌 No. 720, p.7~14 (1956)
- 395) 波木守, 藤井敏郎; No. 7 材料試験連合講演会講演概要集, p.7, 8 (June, 1962)
- 396) 河野清, 大塩明, 江村建三, 木下幸一; No. 21 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, p.60-1, 2 (May, 1966)
- 397) ASTM Designation C290-63T, "Tentative Method for Resistance of Concrete Specimens to Rapid Freezing and Thawing in Water", ASTM Standard, Part 10 (1964)
- 398) 西岡思郎; セメント技術年報 XX, p.504~510 (1966)
- 399) Ivanov, F. M. and Krasovskaya, T. G.; Report of RILEM Symposium, I-11 (Moscow, 1964)
- 400) 村田二郎; コンクリートジャーナル Vol. 4, No. 1, p.34 (1966)
- 401) 西岡思郎, 大江長生; セメントコンクリート No. 285, p.8~14 (1970)
- 402) コンクリート製品, No. 198・199, p.65, 66 (1969)
- 403) 河野清, 梶野洋, 木下幸一; No. 22 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, p.93-1, 2 (May, 1965)
- 404) Mielenz, R. C.; Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part IV, P. P. IV-1, p.1~29 (Tokyo, 1968)

- 405) Daugherty, K. E. and Kowalewski, Jr. M. J.; Proc. of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part IV, S. P. IV - 45, p. 42~51 (Tokyo, 1968)
- 406) 鈴木節三, 西晴哉; セメント技術年報XIII, p. 160~170 (1959)
- 407) 真鍋敏雄, 川田尚哉; セメント技術年報XIII, p. 206~213 (1959)
- 408) 河野清, 林岑生; セメントコンクリートNo. 264, p. 17~21 (1969)
- 409) 小沢章三, "マスコンクリートの初期ひびわれとその防止対策に関する研究", 京都大学学位論文 (Aug., 1961)
- 410) 塚山隆一; セメントコンクリートNo. 214, p. 2~8 (1964)
- 411) 河野清, 大塩明, 江村建三, 木下幸一; セメント技術年報XX, p. 393~396 (1966)
- 412) Timoshenko, S. and Goodier, J. N., "Theory of Elasticity", International Student Edition (1951)
- 413) 国分正胤, 小林正几, 比田正; セメントコンクリートNo. 284, p. 2~8 (1970)
- 414) 荒木謙一, 河野清, 林岑生; No. 21 土木学会中国四国支部学術講演概要集p. 51, 52 (July, 1969)
- 415) 荒木謙一, 河野清, 林岑生; No. 25 土木学会年次学術講演会講演集V, p. 57~60 (Nov., 1970)
- 416) Riha, J.; Report of RILEM Symposium, 1-3 (Moscow, 1964)
- 417) 三浦一郎; 鉄道技術研究所報告No. 307, p. 76~94 (May, 1962)
- 418) 日本セメント技術協会, "コンクリート委員会報告F-7", (May, 1959)
- 419) Neville, A. M.; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 52, p. 47~60 (1955)
- 420) 岡田清, "コンクリートのクリープ", コンクリートパンフレットNo. 29 (Oct., 1948)
- 421) 荒木謙一, 河野清, 竹村和夫; No. 25 土木学会年次学術講演会講演集V, p. 321~324 (Nov., 1970)
- 422) 石橋実, 四戸英男, 有川晋; セメント技術年報XI, p. 388~392 (1957)
- 423) 田中茂美; プレストレストコンクリートVol. 5, No. 4, p. 12~17 (1963)
- 424) 河野清, 林岑生, 竹村和夫; セメントコンクリートNo. 282, p. 31~38 (1970)
- 425) Gonnerman, H. F. and Shuman, E. C.; Proc. ASTM, Vol. 28, Part II, p. 527 (1928)
- 426) 赤沢常雄; 土木学会誌Vol. 29, p. 777 (1943)
- 427) Lynn, I. L. and Palmer, K. E.; Proc. ASTM, Vol. 161, p. 1180 (1961)
- 428) 岡田清; 材料Vol. 18, No. 187, p. 1~8 (1969)
- 429) 岡田清; セメントコンクリートNo. 271, p. 3~7 (1969)
- 430) Stork, J.; General Report of RILEM Symposium, Session - V (Moscow, 1964)
- 431) 河野清; セメントコンクリートNo. 271, p. 35~42 (1969)
- 432) 白山和久, 上村克郎, "気泡コンクリート", オーム社 (Mar., 1964)
- 433) 土木材料ハンドブック編集委員会, "土木材料ハンドブック", p. 239 (Oct., 1968)
- 434) 西晴哉, 大塩明, 福沢公夫; No. 14 材料試験連合講演会講演概要集 (Sept., 1970)
- 435) 日本コンクリート会議, "コンクリート技術の基礎", p. 202~204 (Oct., 1970)
- 436) 竹本国博; 窯業協会誌No. 73, p. 91~97 (1965)
- 437) Volyhensky, A. V.; General Report of RILEM Symposium, Session - III, (Moscow, 1964)
- 438) 須藤儀一; セメントコンクリートNo. 271, p. 27~35 (1969)
- 439) Kalousek, G. L.; Proc. of the 5th International Symposium on the

- Chemistry of Cement, Part III, P. P. III-5, p.523~540 (Tokyo, 1968)
- 440) A C I Committee 516 ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 31, p.125~149 (1934)
- 441) Menzel, C. A. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 62, p.869~907 (1965)
- 442) Mironov, S. A. ; General Report of RILEM Symposium, Session - IV, (Moscow, 1964)
- 443) 河野清 ; 小野田研究報告 Vol. 17, p.295~308 (1966)
- 444) Krylov, B. A. and Tsitelaury, G. I. ; Report of RILEM Symposium, IV - 2 (Moscow, 1964)
- 445) Ganin, V. A. ; Report of RILEM Symposium, IV - 1 (Moscow, 1964)
- 446) Repjev, E. N. and Toroptsev, A. V. ; Report of RILEM Symposium, IV - 4 (Moscow, 1964)
- 447) 前田 一郎 ; セメントコンクリート No. 278, p.9~17 (1970)
- 448) 堀松和夫, "寒中コンクリート", 理工図書 (Oct., 1955)
- 449) E. P. M. International, "Electrical Strengthening of Concrete and Cement", Le Génie Civil, p.2~8 (Feb., 1966)
- 450) Dolgoplov, N. N. ; Report of RILEM Symposium, V - 7 (Moscow, 1964)
- 451) Danilov, N. N. ; Report of RILEM Symposium, V - 5 (Moscow, 1964)
- 452) 梶井基彦, 穂積正一, 中田輝男, 中野繁樹 ; セメントコンクリート No. 272, p.31~37 (1969)
- 453) 池部緑 ; 土木施工 Vol. 7, No. 10, p.65~67 (1966)
- 454) Agamoglanov, R. Sh. ; Report of RILEM Symposium, V - 3 (Moscow, 1964)
- 455) Stupakov, G. I. ; Report of RILEM Symposium, V - 12 (Moscow, 1964)
- 456) ASTM Designation C151-60, "Autoclave Expansion of Portland Cement", ASTM Standard, Part 4 (1958)
- 457) Bozhenov, P. I. and Kavaterova, V. I. ; Report of RILEM Symposium, III - 2 (Moscow, 1964)
- 458) 杉木六郎 ; セメントコンクリート No. 62, p.26, 27 (1952)
- 459) 全国コンクリート製品協会東京支部, "型わく剝離剤に関する研究報告" (Oct., 1965)
- 460) Smith, P. and Chojnachi, B., Proc. ASTM Vol. 63, p.1079~1101 (1963)
- 461) Berio, A. et al., "RILEM Symposium by Correspondence on the Accelerated Hardening of Concrete with a View to Rapid Control Tests", Bull. RILEM, No. 31, p.156~243 (June, 1966)
- 462) 十代田知三 ; セメントコンクリート No. 222, p.12~19 (1965)
- 463) 十代田知三, 藤沢好一 ; 日本建築学会論文報告集 No. 146, p.1~9 (1968), セメントコンクリート No. 62, p.21~32 (1970)
- 464) Malhotra, V. M. ; Indian Concrete Journal, Vol. 43, No. 9, p.342~349 (1969)
- 465) 日本建築学会, "建築工事標準仕様書同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事", p.527~531 (Nov., 1963)
- 466) 吉田徳次郎, "コンクリートおよび鉄筋コンクリートの施工方法", p.527, 528 (Feb., 1951)
- 467) セメント協会, "コンクリート専門委員会報告 F-16", (Sept., 1966)
- 468) 近藤泰夫, 坂静雄篇, "コンクリート工学ハンドブック", p.290 (Oct., 1965)
- 469) Goral, M. L. ; Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 53, p.215~224 (1956)
- 470) 河野清, 梶野洋, 木下幸一 ; セメント技術年報 XII, p.428~434 (1967)